

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN GÉNIE PAPETIER

PAR
YANG LI

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DYNAMIQUE DANS UN BUT
D'OPTIMISATION ET DE CONTRÔLE DU PROCÉDÉ DE MISE EN PÂTE
THERMOMÉCANIQUE

JANVIER 2008

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Avant-propos

Malgré sa complexité, le contrôle du procédé PTM des usines à pâtes et papiers utilise encore la technologie des contrôleurs PID. Ce type de contrôle est limitatif à plusieurs égards: aucun modèle de prédiction, impossibilité de traitement du procédé multivariables, problèmes d'interactions entre les variables des divers contrôleurs, limite dans le traitement des temps de délai, nombre limité des consignes sur la qualité des pâtes et papiers. Bien qu'il existe certains types de contrôleurs avec modèles internes ou par anticipation, ces derniers ne considèrent pas l'influence des copeaux, pourtant prédominante dans ce type de procédé. Par exemple, des variables importantes comme les composantes d'essence du bois et les caractéristiques de copeaux sont toujours regardées comme des constantes et lorsqu'elles apparaissent dans les modèles, elles sont généralement limitées en nombre (densité et humidité).

L'objectif de cette recherche est de comprendre l'impact des copeaux sur la qualité des pâtes, en particulier de comprendre les relations fonctionnelles entre les propriétés de copeaux, les variables de procédé et la qualité des pâtes, dans le but de concevoir des modèles pouvant permettre un ajustement tant du procédé que des composantes de mélange des copeaux, par le contrôle simultané de six consignes importantes des pâtes et papiers que sont: au premier stade, CSF (1) et longueur de fibre (2); au second stade, CSF (3) et longueur de fibre (4); une fois la feuille formée, indice de rupture (5) et coefficient de diffusion (6) .

Remerciements

En premier, je voudrais exprimer mes sincères remerciements à mon directeur, M. Luc Laperrière, et à mon co-directeur, M. Robert Lanouette, pour leurs conseils judicieux, leur guidance effective et leur aide générale. Travailler sous leur direction a été une expérience très heureuse et enrichissante.

J'aimerais aussi remercier les personnes suivantes pour leur coopération dans ce projet : M. Alain Marchand, M. Pierre Gendron et Mme Claudine Delisle. De plus, je remercie ma chère amie, Mme Françoise Cyrenne qui a passé beaucoup de temps pour corriger le français de ma thèse.

Finalement, je remercie ma femme et ma soeur pour leur patience et leurs encouragements.

Résumé

Le procédé PTM est très complexe et difficile à contrôler. Les caractéristiques des copeaux peuvent affecter largement les propriétés des pâtes. Les systèmes de contrôle conventionnels ne peuvent pas réaliser une stratégie de prédiction adéquate, encore moins prédire des résultats basés sur les caractéristiques des copeaux. En conséquence, il existe généralement une grande erreur sur les prédictions des propriétés des pâtes. Pour minimiser cette erreur, on veut développer un nouveau système de contrôle par anticipation qui possède la capacité de mieux prédire les propriétés des pâtes en se basant sur les caractéristiques des copeaux. Ce système a la capacité de choisir automatiquement les paramètres du procédé (entrées) permettant l'atteinte des consignes de qualité des pâtes et papiers (sorties), tout en compensant les temps morts reliés au transport de la pâte (modèle dynamique).

Dans le cadre de nos travaux, nous désirons utiliser des réseaux de neurones pour simuler les deux stades de raffinage de l'unité pilote du CIPP. Basés sur les informations des caractéristiques des copeaux (mesurées par une unité CMS en ligne) et les paramètres du procédé en vigueur, ces modèles peuvent prédire les propriétés des pâtes à partir desquelles un contrôle par anticipation devient possible. Ces modèles sont construits sous la plate-forme logicielle de simulation Cadsim Plus.

Les résultats analytiques et simulés montrent que l'influence des copeaux sur la qualité de la pâte est très significative. Les modèles développés reproduisent bien les caractéristiques de la base de données. Les résultats démontrent que la qualité de pâtes et papiers est plus stable qu'avec le contrôle conventionnel. De plus, la réduction de variabilité qui en résulte permet une réduction importante des coûts de production par économie d'énergie. Le système développé permet finalement de contrôler six consignes par manipulation des paramètres du procédé et/ou des composantes d'essence du bois (à l'aide de vis de mélange).

Mots Clés

Pâte thermomécanique, contrôle, procédé, modèle, simulation, copeaux, pâte, papier, optimisation, réseaux de neurones, statistique.

Table des matières

Avant-propos.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table des matières.....	vi
Liste des figures	xii
Liste des tableaux.....	xviii
Liste des équations	xix
Liste des abréviations.....	xxii
 Chapitre 1 Introduction.....	 1
1.1 Importance de la pâte mécanique.....	1
1.2 Obtention de la pâte mécanique	1
1.3 Complexité du procédé de raffinage	3
1.4 Problématique du contrôle de la qualité des pâtes	4
1.5 Avantage du développement d'un modèle.....	5
 Chapitre 2 Revue de la littérature scientifique	 10
2.1 Modèles de fonctionnement d'un raffineur.....	10
2.1.1 Les modèles mécanistiques.....	10
2.1.2 Les modèles statistiques.....	18
2.1.2.1 Régressions	18
2.1.2.2 Composantes principales (PCA)	20
2.1.2.3 Projections sur une structure latente (PLS).....	24
2.1.3 Les modèles d'intelligence artificielle	28
2.1.3.1 Systèmes Experts (SE)	28
2.1.3.2 Logique Floue (LGFL).....	29

2.1.3.3 Réseaux de Neurones	33
2.2 Les travaux relatifs aux propriétés des copeaux	38
2.3 Contrôle du procédé TMP	42
2.3.1 Le contrôleur PID	43
2.3.2 Le contrôleur par anticipation.....	46
2.3.3 Le contrôle par modèle interne (CMI)	48
2.3.4 Le contrôle par modèle prédictif (CMP).....	50
2.4 Objectifs du projet de recherche	52
Chapitre 3 Analyse multivariables	54
3.1 Plan expérimental.....	54
3.2 Relation entre les caractéristiques des copeaux et les propriétés de pâtes et papiers	58
3.2.1 Explication des effets des paramètres de copeaux sur les propriétés des pâtes et papiers obtenues	60
3.3 Effet des variables du procédé sur la qualité des pâtes et papiers.....	60
3.3.1 Effets des paramètres de procédé du premier stade sur les propriétés des pâtes et papiers	62
3.3.2 Effets des paramètres de procédé du second stade sur les propriétés des pâtes et papiers	64
3.4 Analyse combinée copeaux-procédé.....	66
3.5 Sélection des variables importantes	69
3.6 Relations entre les caractéristiques des copeaux et les variables manipulées du procédé	71
3.7 Relations entre les quatre propriétés des pâtes et papiers	72
Chapitre 4 Modélisation par réseaux de neurones.....	74
4.1 Modèles statiques avec base de données initiale	75
4.1.1 Modèles du premier stade	75
4.1.2 Intégration des modèles du premier stade.....	77
4.1.3 Modèles du second stade	78
4.1.4 Modèles de prédiction des propriétés des pâtes et papiers	80
4.2 Modèle statique avec base de données modifiée	83
4.2.1 Conception d'un régulateur proportionnel.....	85
4.2.2 Compléments de logique	88

4.2.3	Modification de la base de données	90
4.3	Apprentissage et validation des modèles RDN.....	92
4.3.1	Validation avec la base de données modifiée	92
4.3.2	Validation avec de nouvelles données expérimentales.....	93
4.4	Modèle de mélange des copeaux.....	95
Chapitre 5	Modèles dynamiques	99
5.1	Le procédé PTM avec deux stades.....	99
5.1.1	Modèle DDE (Dynamic Data Exchange)	100
5.1.2	Modèle du lessiveur de copeaux.....	100
5.1.3	Modèle de raffineur, stade 1	101
5.1.4	Modèle de raffineur, stade 2	101
5.1.5	Modèle de délai de transport.....	102
5.2	Réponses dynamiques	102
5.2.1	Variation des débits de copeaux	102
5.2.2	Variation des propriétés des copeaux	103
5.3	Synchronisation des modèles dynamiques et RDN	104
5.4	Réponses statiques et dynamiques	105
5.4.1	Changement des consignes (réponses statiques)	105
5.4.2	Changement des caractéristiques de copeaux (réponses dynamiques).....	109
Chapitre 6	Contrôle du procédé.....	114
6.1	Contrôle par anticipation du CSF_1 et LF_1	114
6.1.1	Principe général de fonctionnement	114
6.1.2	Ajout de contraintes	114
6.2	Contrôle par anticipation du CSF_2 et LF_2	116
6.2.1	Modèle R_P de LF_2.....	118
6.3	Réponses en boucle ouverte	120
6.3.1	Calibration du contrôleur de CSF_1	123
6.3.2	Calibration du contrôleur de LF_1.....	123
6.3.3	Calibration du contrôleur de CSF_2	123
6.3.4	Calibration du contrôleur de LF_2.....	124
6.4	Réponses en boucle fermée.....	124

6.4.1 Changements de consigne.....	124
6.4.1.1 Réponses à des changements séquentiels.....	124
6.4.1.2 Réponses à des changements simultanés	126
6.4.2 Changements des caractéristiques de copeaux	127
6.4.2.1 Réponses à des changements séquentiels.....	128
6.4.2.2 Réponses à des changements simultanés	133
6.4.3 Changements simultanés consignes-copeaux	135
6.5 Avantages du contrôle par anticipation.....	136
6.5.1 Comparaison avec 100% d'épinette.....	138
6.5.2 Comparaison en utilisant la base de données.....	140
6.6 Limites des contrôleurs	142
6.6.1 Extrapolation de la base de données	142
6.6.2 Interaction des contrôleurs entre les deux stades.....	142
Chapitre 7 Contrôle du mélange des copeaux	144
7.1 Effets des essences sur les propriétés du papier.....	144
7.1.1 Effets sur Rupture_2	144
7.1.2 Effets sur C_Diff_2.....	145
7.2 Contrôle par anticipation de Rupture_2 et C_Diff_2.....	145
7.2.1 Calcul des limites de consignes	146
7.2.2 Contraintes sur les variables manipulées	147
7.2.3 Compléments de logique	148
7.2.3.1 Mise en attente des contrôleurs de Rupture_2 et C_Diff_2	148
7.2.3.2 Action conditionnelle des contrôleurs.....	149
7.2.3.3 Modèle de garde.....	150
7.2.3.4 Action conditionnelle supplémentaire sur EP.....	152
7.2.3.5 Résumé des contrôles logiques des composantes de copeaux.....	153
7.3 Réponses en boucle ouverte	155
7.3.1 Calibration du contrôleur de Rupture_2	155
7.3.2 Calibration du contrôleur de C_Diff_2.....	155
7.3.3 Calibration du contrôleur de Rupture_2 et C_diff_2	156
7.4 Réponses en boucle fermée.....	156

7.4.1 Changements de consigne.....	157
7.4.1.1 Réponses à des changements séquentiels.....	157
7.4.1.2 Réponses à des changements simultanés	158
7.5 Avantages du contrôle du mélange des copeaux.....	159
Chapitre 8 Économie d'énergie.....	163
8.1 Relation entre énergie spécifique et CSF	163
8.1.1 Diminution de la charge.....	164
8.1.2 Augmentation du taux de production.....	164
8.2 Méthode de calcul	166
8.2.1 Coût de référence	166
8.2.2 Paramètres impliqués dans le calcul des coûts électriques	166
8.2.2.1 Calcul basé sur l'intégrale de la charge de moteur ...	167
8.2.2.2 Calcul basé sur l'intégrale de l'énergie spécifique ...	167
8.2.3 Implantation du calcul dans Cadsim Plus	168
8.3 Réduction des coûts de production	169
8.3.1 Analyse du premier bloc	171
8.3.2 Analyse du second bloc	172
8.3.3 Analyse du troisième bloc.....	173
8.4 Augmentation du profit.....	174
8.4.1 Analyse du premier bloc	175
8.4.2 Analyse du second bloc	176
8.4.3 Analyse du troisième bloc.....	177
Chapitre 9 Conclusions	179
9.1 Résultats importants	179
9.1.1 Analyse PLS	179
9.1.2 Modélisation RDN.....	180
9.1.3 Modélisation dynamique.....	180
9.1.4 Contrôle des raffineurs.....	180
9.1.5 Contrôle des essences	182
9.2 Améliorations possibles	183
9.2.1 Autres paramètres d'influence	183

9.2.2	Domaine expérimental	183
9.2.3	Implantation au DCS du CIPP	184
9.2.4	Mise à l'échelle	185
	Bibliographie.....	186
	Annexe 1 Méthode Lambda.....	197

Liste des figures

Figure 1.1	Défilage et fibrillation dans le procédé de raffinage	2
Figure 1.2	Géométrie de plaque de raffineur	2
Figure 1.3	Comparaison entre le modèle conventionnel et le modèle CA.....	6
Figure 1.4	Le modèle prédictif réduit la consommation d'énergie.....	7
Figure 1.5	Esquisse du système de contrôle développé	8
Figure 1.6	Esquisse du système de contrôle développé incluant manipulation du mélange des copeaux.....	9
Figure 2.1	Modèle mécanistique d'un élément de pâte entre les plaques	11
Figure 2.2	Variables du modèle mécanistique de TMP.....	14
Figure 2.3	Trois composantes principales dans le modèle PCA	21
Figure 2.4	Pré-traitement des données	22
Figure 2.5	Données avant et après le pré-traitement	22
Figure 2.6	Pointage et charge plot basé sur 8 fractions des copeaux	23
Figure 2.7	Pointage et charge plot pour explorer l'influence des copeaux sur le procédé de raffinage	24
Figure 2.8	Méthode PLS faisant la relation entre deux matrices de données.....	25
Figure 2.9	Une régression de la réponse Y et du prédicteur X dans PLS.....	25
Figure 2.10	Projections des variables X et Y dans l'espace des X et celui des Y	26
Figure 2.11	Résiduels du modèle PLS à 2 vecteurs latents	26
Figure 2.12	Les variables importantes du modèle PLS	28
Figure 2.13	Structure d'un système expert.....	29
Figure 2.14	Représentation de termes linguistiques d'une logique floue.....	30
Figure 2.15	Interactions entre les différents groupes de variables utilisées dans le modèle de LGFL	31
Figure 2.16	Modèle de neurone.....	34
Figure 2.17	Système de neurones artificiels avec trois niveaux.....	35
Figure 2.18	Apprentissage des réseaux de neurone.....	36
Figure 2.19	Schéma du procédé CTMP	37
Figure 2.20	La structure des réseaux de neurone	37
Figure 2.21	Les réseaux pour le contrôle, l'optimisation et la simulation du procédé ..	38
Figure 2.22	Schéma du système ScanChip.....	39

Figure 2.23	Le système CMS	40
Figure 2.24	Les valeurs observées et prédites de la blancheur ISO	42
Figure 2.25	Utilisation de PID dans une boucle de contrôle avec rétroaction	44
Figure 2.26	Système de contrôle PI.....	45
Figure 2.27	Système de contrôle à action directe.....	47
Figure 2.28	Réponse du contrôle à action directe vs le contrôle PID	47
Figure 2.29	Contrôleur adaptatif de consistance	48
Figure 2.30	Structure du contrôleur CMI	49
Figure 2.31	Structure du contrôleur d'un CMP.....	50
Figure 2.32	Illustration graphique de l'opération d'un contrôle CMP	51
Figure 2.33	Schéma d'une stratégie de contrôle à deux niveaux.....	52
Figure 3.1	Quatre composantes principales obtenues pour les dix variables des copeaux	58
Figure 3.2	Importance relative des dix variables des copeaux qui contribuent aux quatre composantes principales.....	58
Figure 3.3	Relations entre les variables des copeaux et les propriétés de pâtes et papiers	59
Figure 3.4	Sept composantes principales obtenues pour les dix variables du procédé.....	61
Figure 3.5	Importance relative des dix variables du procédé qui contribuent aux quatre composantes principales.....	61
Figure 3.6	Relations entre les variables du procédé et les propriétés des pâtes et papiers	62
Figure 3.7	Les relations entre Ent_2, Charge_2 et les propriétés des pâtes et papiers dans le premier groupe d'essais	65
Figure 3.8	Recoupement des domaines d'explication respectifs des copeaux et des variables du procédé.....	67
Figure 3.9	Sept composantes principales obtenues pour les vingt variables copeaux et procédé	67
Figure 3.10	Comparaison des relations entre les propriétés de pâte et les variables des copeaux et de procédé	68
Figure 3.11	Relations entre les caractéristiques des copeaux et les variables manipulées du procédé.....	71
Figure 3.12	Relations entre les propriétés des pâtes et papiers	72
Figure 4.1	Modèle direct de la Charge_1	75
Figure 4.2	Modèle inverse du Stade_1	76
Figure 4.3	Modèle direct de Pâte_1	76

Figure 4.4	Lien entre les trois modèles du premier stade	77
Figure 4.5	Modèle de Charge_2	79
Figure 4.6	Modèle de Stade_2	79
Figure 4.7	Lien entre les deux modèles du second stade.....	80
Figure 4.8	Modèle Ener_Sp_Tot	81
Figure 4.9	Modèle de Pâte_2	81
Figure 4.10	Modèle de papier	82
Figure 4.11	Structure des modèles statiques	82
Figure 4.12	Modèles différents selon le nombre de points d'apprentissage	84
Figure 4.13	Comparaison des relations proportionnelles entre Charge_1 et CSF_1 de deux groupes d'essais différents.....	86
Figure 4.14	Le modèle régulateur proportionnel.....	87
Figure 4.15	Jugement du sens de variation.....	89
Figure 4.16	Expansion des données dans un groupe d'essais	91
Figure 4.17	Apprentissage et validation des modèles RDN	92
Figure 4.18	Erreurs finales des sorties des divers modèles	93
Figure 4.19	Validation des modèles avec 30 lignes de nouveaux essais.....	94
Figure 4.20	Validation avec les six lignes cachées	95
Figure 4.21	Modèle de mélange des copeaux.....	97
Figure 4.22	Structure finale de la modélisation.....	97
Figure 5.1	Le procédé de PTM avec deux stades	99
Figure 5.2	Réponse dynamique du procédé face à un changement d'échelon du débit total de fibre	103
Figure 5.3	Réponses dynamiques des propriétés de copeaux à la sortie du mélangeur	104
Figure 5.4	Liens entre les parties dynamiques et statiques.....	105
Figure 5.5	Réponses statiques face à des changements de consignes CSF_1	106
Figure 5.6	Réponses statiques face à des changements de consignes CSF_2	107
Figure 5.7	Réponses statiques face à des changements de consignes LF_2.....	107
Figure 5.8	Réponses statiques face à des changements de consignes Rupture_2	108
Figure 5.9	Réponses statiques face à des changements de consignes C_Diff_2	109
Figure 5.10	Réponses dynamiques face à un changement de la luminance	110
Figure 5.11	Réponses dynamiques face à un changement de l'humidité.....	111
Figure 5.12	Réponses dynamiques face à un changement de la densité	112

Figure 5.13	Réponses dynamiques face à un changement de l'EP	113
Figure 6.1	Schéma de simulation des contrôleurs de CSF_1 et LF_1.....	115
Figure 6.2	Diagramme des contrôleurs par anticipation de CSF_1 et LF_1	115
Figure 6.3	Contraintes sur les variables anticipées manipulées.	116
Figure 6.4	Schéma de simulation des contrôleurs du second stade.....	117
Figure 6.5	Diagramme des contrôleurs par anticipation du second stade	117
Figure 6.6	Relation entre $\Delta Ent_2 / \Delta LF_2$ et les autres variables de la BD	118
Figure 6.7	Modèle de R_P pour prédire $\Delta Ent_2 / \Delta LF_2$	119
Figure 6.8	Contrôleur de LF_2 avec régulateur proportionnel.....	119
Figure 6.9	Paramètres d'un contrôleur PID.....	121
Figure 6.10	Utilisation d'un « bump test » sur un système du premier ordre	121
Figure 6.11	Échelon du contrôleur CSF_1	123
Figure 6.12	Échelon du contrôleur LF_1	123
Figure 6.13	Échelon du contrôleur CSF_2	124
Figure 6.14	Échelon du contrôleur LF_2	124
Figure 6.15	Réponses dynamiques des quatre contrôleurs suite à des changements séquentiels des quatre consignes CSF_1 LF_1 CSF_2 et LF_2	125
Figure 6.16	Réponses dynamiques des quatre contrôleurs suite à des changements simultanés des 4 consignes.....	127
Figure 6.17	Relation entre les paramètres Luminance, H, S, L de la CMS et l'âge des copeaux	128
Figure 6.18	Réponses dynamiques sur le changement de l'humidité	130
Figure 6.19	Réponses dynamiques sur le changement de la luminance.....	131
Figure 6.20	Réponses dynamiques au changement de la densité.....	132
Figure 6.21	Changement des caractéristiques de copeaux.....	133
Figure 6.22	Réponses dynamiques suite à l'introduction de copeaux plus frais.....	134
Figure 6.23	Schéma global sur les modèles et contrôleurs	137
Figure 6.24	Comparaison de la structure entre le contrôleur CA et le PID conventionnel.....	137
Figure 6.25	Signal des propriétés de copeaux (100% EP) en entrée de la simulation avec 6% de perturbation.....	138
Figure 6.26	Comparaison du CSF_1, CSF_2 et LF_2 entre CA et PI conventionnel (100%EP).....	139
Figure 6.27	Comparaison de CA et PI avec la consigne CSF_2 150.6mL.....	139

Figure 6.28	Comparaison de la distribution des sorties entre CA et PI avec 100% EP	140
Figure 6.29	Comparaison du CSF_2 obtenu des contrôleurs CA et PI, en utilisant tous les essais de la base de données	141
Figure 6.30	Comparaison de la distribution des sorties entre CA et PI (toute la base de données).....	141
Figure 7.1	Schéma de simulation des contrôleurs de Rupture_2, C_Diff_2 et R_C.	146
Figure 7.2	Diagramme des contrôleurs par anticipation de Rupture_2 et C_Diff_2.	147
Figure 7.3	Contraintes sur les variables manipulées et mesurées.....	148
Figure 7.4	Diagramme simple de la logique de mise en attente.....	149
Figure 7.5	Schéma simplifié du principe d'actions conditionnelles pour BOU, SAP et EP	150
Figure 7.6	Comparaison entre les deux états du jugement sur le modèle de Garde..	151
Figure 7.7	Schéma de la logique d'action conditionnelle de EP	153
Figure 7.8	Schéma détaillé de la logique du contrôle des composantes de copeaux	154
Figure 7.9	« bump test » du contrôleur de Rupture_2 par action sur BOU	155
Figure 7.10	« bump test » du contrôleur de C_Diff_2 par action sur SAP	155
Figure 7.11	« bump test » du contrôleur de Rupture_2 + C_Diff_2 par action sur EP.....	156
Figure 7.12	Réponses dynamiques des contrôleurs de Rupture_2 (haut) C_Diff_2 (bas) face à des changements séquentiels de consigne	157
Figure 7.13	Réponse dynamique du contrôleur de Rupture_2+C_Diff_2 à des changements séquentiels des deux consignes	158
Figure 7.14	Réponses face à des changements simultanés des deux consignes Rupture_2 et C_Diff_2.....	159
Figure 7.15	Schéma global des modèles CA avec la section du contrôle de copeaux.....	160
Figure 8.1	Diminution de la puissance électrique	164
Figure 8.2	Augmentation de taux de production	165
Figure 8.3	Calcul du coût électrique dans Cadsim Plus	168
Figure 8.4	Comparaison de charge_2, CSF_2, \$/T entre PI et CA (0%EP, 20%SAP, 40%PG, 40%BOU).....	171
Figure 8.5	Comparaison de charge_2, CSF_2, \$/T entre PI et CA (100%EP).....	172
Figure 8.6	Comparaison de charge_2, CSF_2, \$/T entre PI et CA (100%SAP).....	173
Figure 8.7	Comparaison de CSF_2 entre PI et CA après augmentation du taux de production (0% EP, 20%SAP, 40%PG, 40% BOU).....	176

Figure 8.8	Comparaison de CSF_2 entre PI et CA après augmentation du taux de production (100% EP).....	177
Figure 8.9	Comparaison de CSF_2 entre PI et CA après augmentation du taux de production (100% SAP).....	178
Figure 9.1	Relation entre les caractéristiques de copeaux et les qualités de pâtes....	179
Figure 9.2	Relation entre énergie spécifique et CSF	181
Figure 9.3	Relation entre l'énergie spécifique et le CSF	182
Figure A1-1	Procédé à rétroaction.....	197
Figure A1-2	« bump test » sur un système du premier ordre avec délai	199

Liste des tableaux

Tableau 2-1	Plan expérimental pour le mélange des 4 essences différentes.....	41
Tableau 2-2	Effet de la qualité des copeaux sur les charges peroxydes nécessaires à l'obtention d'une blancheur de pâte	42
Tableau 3-1	Proportion des mélanges dans le plan expérimental	55
Tableau 3-2	Extrait des données expérimentales: propriétés de copeaux et paramètres du raffineur.....	56
Tableau 3-3	Extrait des données expérimentales: essences et qualité des pâtes	56
Tableau 3-4	Liste des variables retenues, leurs unités et leur rôle individuel.....	70
Tableau 4-1	Incohérences de certaines valeurs dans la base de données.....	84
Tableau 4-2	Une partie des nouvelles données pour entraîner le modèle R_P	88
Tableau 4-3	Aperçu de la modification de la base de données pour le stade 1	91
Tableau 4-4	Nouvelles données expérimentales	94
Tableau 4-5	Relation entre l'essence du bois et les propriétés de papier.....	96
Tableau 5-1	Changement des propriétés de copeaux entrant dans le procédé	103
Tableau 5-2	Variables utilisées pour examiner les réponses dynamiques des modèles.....	106
Tableau 6-1	Données pour l'apprentissage du modèle de R_P.....	120
Tableau 6-2	Entrées initiales des modèles	122
Tableau 6-3	Relations entre les propriétés de copeaux, les variables manipulées et les qualités de pâte et papier.....	129
Tableau 6-4	Changements simultanés consignes-copeaux	135
Tableau 6-5	Variables d'entrée initiales.....	138
Tableau 7-1	Résultat simulé sur le modèle du contrôle de copeaux	161
Tableau 8-1	Comparaison du coût électrique entre CA et PI.....	170
Tableau 8-2	Comparaison du profit par augmentation du taux de production.....	175

Liste des équations

$\sum \text{forces} = ma$	Équation 2.1..... 10
Entrée + génération – sortie – consommation = accumulation	Équation 2.2 10
$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$	Équation 2.3 10
$F = C - Fr_1 - Fr_2 + bS$	Équation 2.4..... 12
$\frac{dv}{dr} = \frac{r\omega^2}{v} - a \frac{\mu_r}{\mu_{r1}} \frac{Ec(r)}{\omega(r_2^2 - r_1^2)}$	Équation 2.5 12
$\tau = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{v}$	Équation 2.6..... 13
$e = \frac{E}{n}$	Équation 2.7..... 13
$n = \int_{r_1}^{r_2} Nr \omega dr$	Équation 2.8..... 13
$E = \tau e'$	Équation 2.9..... 13
$F_c = k_1 \rho TS$	Équation 2.10..... 15
$ML = k_2 CP + K_3 F_c$	Équation 2.11..... 15
$SE = ML / F_c$	Équation 2.12..... 15
$e = SE / N$	Équation 2.13..... 15
$N = n h \omega [(r_1 + r_2) / 2] \tau$	Équation 2.14..... 15
$CSF = [CSF_0 - k_4 (SE - SE_0)] \times 10^{-K_5 (E - E_0)} + k_6 C_{so3}$	Équation 2.15..... 16
$ML = e a + b \ln(tss) + c \ln(P_c) + d \ln(Fdv)$	Équation 2.16..... 16
$F_c = 1,44 * K_c * tss * \rho$	Équation 2.17..... 17
$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{Di}$	Équation 2.18..... 17
$Y = b_0 + b_1 X$	Équation 2.19..... 18
$Y = b_0 + b_1 X^2$	Équation 2.20..... 18
$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1 * X_2$	Équation 2.21..... 19
$Y = b_0 + b_1 P + b_2 P^2 + b_3 Q + b_4 Q^2 + b_5 R + b_6 R^2$	Équation 2.22..... 19
$Y = b_0 + b_1 P + b_2 P^2 + b_3 Q + b_4 Q^2 + b_5 R + b_6 R^2 + b_7 P * Q + b_8 P * R + b_9 Q * R$	Équation 2.23. 19
$Y_1 = -0,0027X_1 - 0,067X_2 + 0,12X_3 + 0,21X_4 + 0,1X_5 + 0,0025X_8 + 0,4X_{11} - 1,7$	Équation 2.24..... 19

$Y2 = -0,0059X1 - 0,53X2 + 0,46X3 + 0,92X4 + 0,36X5 - 6,8X7 + 0,025X8 - 13,9$	Équation 2.25	19
$Q = (TI / 9)^{2/3} (BL / 8)^{1/3} (SC / 800)^{4/3}$	Équation 2.26.....	31
$f_i(x) \approx 0$	Équation 2.27.....	31
$\Delta PG = -0,78\Delta SE - 0,814\Delta PR - 4\exp(-5\Delta PA) + 0,01\Delta CN$	Équation 2.28.....	32
$\Delta CSF = -250\Delta SE - 104\Delta PR - 0,05\Delta PA$	Équation 2.29.....	32
$\Delta CSF = -200\Delta SE - 32\Delta PR$	Équation 2.30.....	32
$CSF = 1130 \exp[-0,02 - 0,033FL[1 + (2 - 0,11CN)]]$	Équation 2.31.....	32
$TI = 0,103CD + 11,5FL - 57,9$	Équation 2.32.....	32
$\Delta SD = -40,2\Delta FL - 0,58\Delta CD$	Équation 2.33.....	32
$\Delta SC = -0,56\Delta SD - 16,8\Delta FC$	Équation 2.34.....	32
$\mu_i = \exp[-w_i f_i^2(X)]$	Équation 2.35.....	32
$\mu_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp(-w_i f_i^2(X))$	Équation 2.36.....	33
$NET = \sum_{n=1}^N X_n W_n$	Équation 2.37.....	34
$Y = f(NET)$	Équation 2.38.....	34
$Y_p = f\left(\sum_{m=1}^M \left(f\left(\sum_{n=1}^N X_n W_{nm}\right)\right) \times K_{mp}\right)$	Équation 2.39.....	35
$u(t) = K_c e(t)$	Équation 2.40.....	43
$u(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt$	Équation 2.41.....	43
$u(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt}$	Équation 2.42.....	44
$\hat{d}(s) = [G_p(s) - G_m(s)] * m(s) + d(s)$	Équation 2.43.....	49
$Y(s) = \frac{[R(s) - d(s)] G_{CMI}(s) G_p(s)}{1 + [G_p(s) - G_m(s)] G_{CMI}(s)} + d(s)$	Équation 2.44.....	50
$A(EP\%) + B(SAP\%) + C(PG\%) + D(BOU\%) + E(Lumin) + F(H) + G(S) + H(H) + I(L) + J(Humid) + K(Dens) + L(Cons_1) + M(Charge_1) = CSF_1$	Équation 4.1.....	85

CSF / Charge = (CSFmax – CSFmin) / (Chargemax – Chargemin)	Équation 4.2.....	87
Charge / Ent = (Chargemax – Chargemin) / (Entmax – Entmin)	Équation 4.3.....	87
$\frac{dM_{réservoir}}{dt} = \sum \dot{M}_{entrée} - \sum \dot{M}_{sortie}$	Équation 5.1.....	100
$Kp = \Delta Y / \Delta M$	Équation 6.1.....	122
ES (énergie spécifique)= P(puissance) / TP(taux production) = $\frac{J/s}{kg/s} = J/kg$	Équation 8.1.....	163
Énergie_Spécifique_1 (kJ/kg) = (N kJ/s) / (M kg/s) = N / M (kJ/kg)	Équation 8.2	166
Énergie_Spécifique_1 (MJ / T) = N/ M (kJ/kg)*0.001 MJ / kJ * 1000 kg/T= N/ M (MJ/ T)	Équation 8.3.....	166
$\int_0^{\Delta T} N \text{ (kwh)} dt * P (\$ / \text{kwh}) = N' * \Delta t * P = N' * P * 1000 / M / 3600 (\$/T)$	Équation 8.4.....	167
MES = N' / M(MJ/T)	Équation 8.5.....	168
Le coût d'énergie = 1000*N' / M* P /3600 (\$/T)	Équation 8.6.....	168
Énergie Spécifique Totale = (Charge_1 + Charge_2) / Taux Production	Équation 8.7	169
PR (\$) = (rendement augmenté - rendement initial) * valeur de pâte par tonne	Équation 8.8	174
$Y_{pv} = (Y_{sp} - Y_{pv}) * G_c(s) * G_p(s)$	Équation A1-1	197
$G_{sp}(s) = Y_{pv} / Y_{sp} = G_c(s) * G_p(s) / [1 + G_c(s) * G_p(s)]$	Équation A1-2	197
$G_c(s) = [1 / G_p(s)] * \{G_p(s) / [1 - G_{sp}(s)]\}$	Équation A1-3	197
$G_{sp}(s) = 1 / (\lambda s + 1)$	Équation A1-4	197
$G_c(s) = [1 / G_p(s)] * [1 / \lambda s]$	Équation A1-5	198
$G_p(s) = K_p / (\tau s + 1)$	Équation A1-6	198
$G_c(s) = [\tau / (K_p * \lambda)] * [(\tau s + 1) / \tau s]$	Équation A1-7	198
$G_c(s) = K_c * [(\tau s + 1) / \tau s]$	Équation A1-8	198
$K_c = \tau / (K_p * \lambda) = (1 / K_p) * (\tau / \lambda)$	Équation A1-9	199
$K_p = \Delta Y / \Delta M$	Équation A1-10	199

Liste des abréviations

CA	contrôle par anticipation
C_Diff_2	coefficient de diffusion de la lumière du papier
Charge_1	charge de moteur du stade_1
Charge_2	charge de moteur du stade_2
CIPP	centre intégré en pâtes et papiers
CMS	chip management system
Consis_1	consistance du stade_1
Consis_2	consistance du stade_2
CRIQ	centre de recherche industrielle Québec
CSF_1	indice d'égouttage du stade_1 (canadian standard freeness)
CSF_2	indice d'égouttage du stade_2
Dens	densité des copeaux
Dil_1	dilution du stade_1
Dil_2	dilution du stade_2
Ent_1	entrefer de plaque du stade_1
Ent_2	entrefer de plaque du stade_2
HSL	paramètres de couleur mesurés par CMS : hue, saturation, luminance
Humid	humidité de surface de copeaux
LF_1	longueur moyenne des fibres du stade_1
LF_2	longueur moyenne des fibres du stade_2
LGFL	logique floue
Lumin	luminance de copeaux
MPC	« model predictive controller », contrôleur par modèle prédictif
PID	contrôleur proportionnel, intégral, dérivatif
Prod_1	taux de production du stade_1
Prod_2	taux de production du stade_2
PTM	pâte thermomécanique
R_P	modèle régulateur proportionnel
Rupture_2	indice de rupture du papier
Temp_1	température du stade_1
Vit_2	vitesse de rotation du stade_2

Chapitre 1 Introduction

1.1 Importance de la pâte mécanique

Le Canada représente une riche ressource forestière. Il est donc un grand producteur de pâte mécanique (avec plus de 140 usines), surtout utilisée pour la production du papier journal. Le Québec fournit à lui seul 44,5% de la production canadienne de papier journal [1].

En comparaison avec la pâte chimique dans la production du papier journal, la pâte mécanique est plus écologique et plus économique : moins de pollution, sans équipement chimique additionnel, plus haut rendement, moins de résidus, plus de fibres récupérées, moindres coûts de transport [2]. Du point de vue de la qualité du papier, il est possible d'en produire un papier à grammage plus bas tout en maintenant une opacité et un contenu en bûchettes acceptables [1].

1.2 Obtention de la pâte mécanique

Il existe deux types de pâtes mécaniques : la pâte mécanique de raffineur et la pâte de meule. Dans cette recherche, nous étudions la pâte thermomécanique (PTM) de raffinage. En général, le procédé de raffinage possède deux actions principales, défibrage et fibrillation, comme présenté à la figure 1.1 [3].

La figure 1.2 montre la géométrie des plaques de raffinage. Les copeaux sont brisés dans la zone de broyage, les fibres sont séparées dans la zone de défibrage, et finalement développées dans la zone de fibrillation.

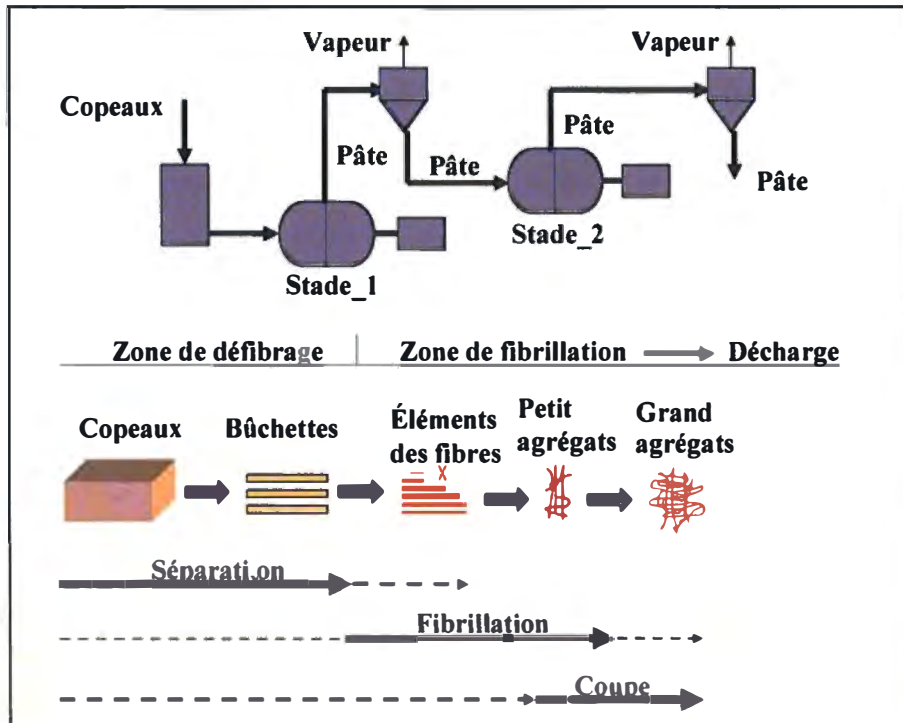


Figure 1.1 Défibrage et fibrillation dans le procédé de raffinage

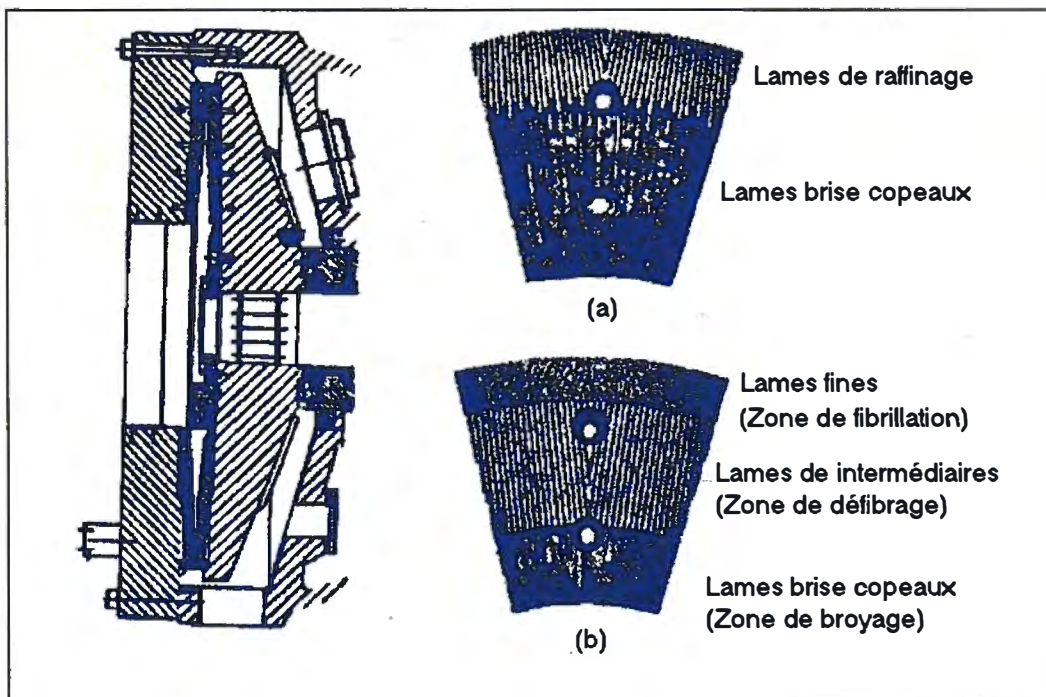


Figure 1.2 Géométrie de plaque de raffineur

1.3 Complexité du procédé de raffinage

Pendant l'opération de raffinage, de nombreux facteurs affectent directement ou indirectement la qualité de la pâte. Parmi ces variables, certaines relations sont régulières, on peut les simuler avec les régressions, telles que la vitesse de rotation des plaques vs la consommation d'énergie et l'intensité de raffinage [4, 5], la relation entre la fraction de la longueur de fibre et les propriétés de papier [6]. Mais, il existe aussi des situations où ces facteurs interagissent selon des modes complexes et déroutants. Par exemple, même si on peut mesurer la consistance de la pâte à la sortie du raffineur, on ne peut pas en tirer exactement les consistances dans chaque zone entre les plaques. De plus, plus rapide est la mesure de consistance, et moins exacte est la valeur mesurée. C'est pourquoi on utilise la calibration pour corriger dynamiquement le gain de lors des mesures en ligne [7].

En général, les divers facteurs d'influence peuvent être divisés en 3 groupes [8, 9] :

Les propriétés du bois (facteurs de matière première): les essences de bois et les pourcentages de mélange, la densité, l'humidité, les dimensions de copeaux, la blancheur, le contenu en écorce, l'âge et le pourcentage de bois de printemps et de bois d'été, etc.

Les paramètres de procédé : l'énergie appliquée lors du raffinage, l'entrefer des plaques, la vitesse de la vis d'alimentation, la température, la vitesse de rotation des plaques, la dilution, etc.

Les caractéristiques des plaques : la géométrie des plaques (patron grossier ou fin, angle des barres, barrages et saignées), le type de raffineur (simple ou double disque), l'état d'usure des plaques, etc.

Ces trois groupes de facteurs ont tous un impact sur la qualité des pâtes produites [10, 11, 12]. Par conséquent, pour produire des pâtes de qualité désirée, on doit faire l'ajustement approprié des trois groupes de facteurs pendant l'opération [13,14,15].

1.4 Problématique du contrôle de la qualité des pâtes

Le but final du contrôle du procédé de raffinage est généralement de maintenir la qualité de la pâte aussi uniforme que possible à un coût minimal. On vient de le voir, le raffinage est un procédé multivariables [16]. Non seulement la qualité de pâte est affectée par les variables manipulées du procédé, mais elle est aussi affectée par l'essence de bois [17,18,19] et les caractéristiques des copeaux [20]. Dans la majorité des usines, on contrôle souvent la qualité de pâte en ajustant automatiquement ou manuellement certaines variables du procédé telles que l'énergie spécifique, l'entrefer des plaques, la dilution, la vitesse de rotation, la vitesse d'alimentation, etc. Chaque boucle de contrôle conventionnelle (contrôle PID) généralement utilisée ne permet cependant de contrôler qu'une propriété de pâte avec une seule variable manipulée. De plus, ce type de contrôle ne possède aucune capacité de prédiction basée sur une perturbation possible dans la qualité des copeaux [21].

En pratique, il existe divers types de modèles utilisés dans le contrôle de ce procédé, par exemple: modèle mathématique [22], modèle empirique et semi empirique [23], modèle prédictif d'un MPC [24], etc. Dans cette recherche, avec un modèle de réseaux de neurones, on peut modéliser le procédé multivariables et faire des prédictions sur les propriétés de pâtes obtenues à partir de combinaisons différentes de copeaux et de paramètres du procédé [25]. Le modèle obtenu peut ensuite servir de base à une stratégie de contrôle en ligne du procédé.

Avant de construire un tel modèle, il faut premièrement obtenir des données expérimentales à partir desquelles on doit analyser les relations entre les variables d'entrée et de sortie, afin de trouver les relations les plus influentes. Les outils d'analyse multivariables [26], surtout les projections sur structures latentes (Projection to Latent Structures, PLS) peuvent s'avérer très efficaces pour analyser statistiquement les données [27].

Les résultats de cette analyse montrent que les propriétés des copeaux peuvent influencer largement les propriétés des pâtes et ces variables ont au moins autant d'influence que les variables manipulées du procédé (chapitre 3). Si on construit un

modèle sans considérer les facteurs reliés aux copeaux (comme la majorité des contrôles conventionnels), les résultats calculés seront imparfaits, i.e. les erreurs entre les prédictions des propriétés des pâtes et les mesures réelles de ces dernières en laboratoire seront plus grandes.

Même si certains modèles incluent des propriétés des copeaux comme variables, ces dernières sont souvent considérées comme fixes dans le temps et ne sont mises à jour que lorsqu'on change le mélange [28]. En pratique, pendant l'opération, les variables des copeaux changent continuellement. Il faut donc idéalement mesurer dynamiquement les caractéristiques des copeaux en ligne et les mettre à jour dans le modèle. Notre recherche fait appel à l'appareil CMS, développé par le CRIQ, qui possède la capacité de lire certaines propriétés de copeaux en ligne [29].

1.5 Avantage du développement d'un modèle

Avec un contrôleur PID conventionnel, on ajuste plusieurs paramètres de procédé en analysant l'erreur entre les consignes de propriétés des pâtes et les mesures en laboratoire sur ces dernières. Quoique cette méthode soit utilisée largement dans les usines, elle présente des imperfections: au niveau de la capacité de prédiction, les boucles locales n'ont aucune information explicite sur les propriétés des pâtes; au niveau de la dynamique du procédé, les boucles locales sont ajustées instantanément à partir d'une mesure possédant pourtant un certain délai. Il peut en résulter une production hors norme, i.e. une pâte inadéquate est déjà produite avant que les paramètres de procédé soient réajustés, à cause du délai entre la mesure en laboratoire et le moment de la correction; au niveau des variables d'influence, les boucles locales sont peu ou pas influencées par les paramètres relatifs aux copeaux, faute de pouvoir les mesurer. Or, les caractéristiques des copeaux peuvent aussi affecter largement la qualité de pâte. De plus, les caractéristiques des copeaux ne sont pas uniformes, on ne peut donc pas les regarder simplement comme une constante.

Afin de contrôler adéquatement le procédé du raffinage, un contrôleur avec modèle de copeaux permettra donc de déterminer la combinaison des paramètres opérationnels du procédé qui minimise l'erreur entre les propriétés prédites des pâtes et leurs consignes.

À la lumière de ces observations, ce contrôleur devra présenter trois fonctions essentielles : estimation des propriétés des pâtes, minimisation de l'erreur entre les propriétés estimées et les consignes, et mesure des caractéristiques des copeaux en ligne pour une estimation plus fiable.

Les figures 1.3 et 1.4 présentent une comparaison économique entre le contrôle conventionnel (PID) et un contrôle plus avancé comme le CA. Dans la figure 1.3 on voit qu'avec un contrôleur avancé, la variabilité du produit est réduite et la propriété désirée peut donc être contrôlée plus près de sa limite. Il en résulte non seulement une économie potentielle mais également un produit plus stable et uniforme.

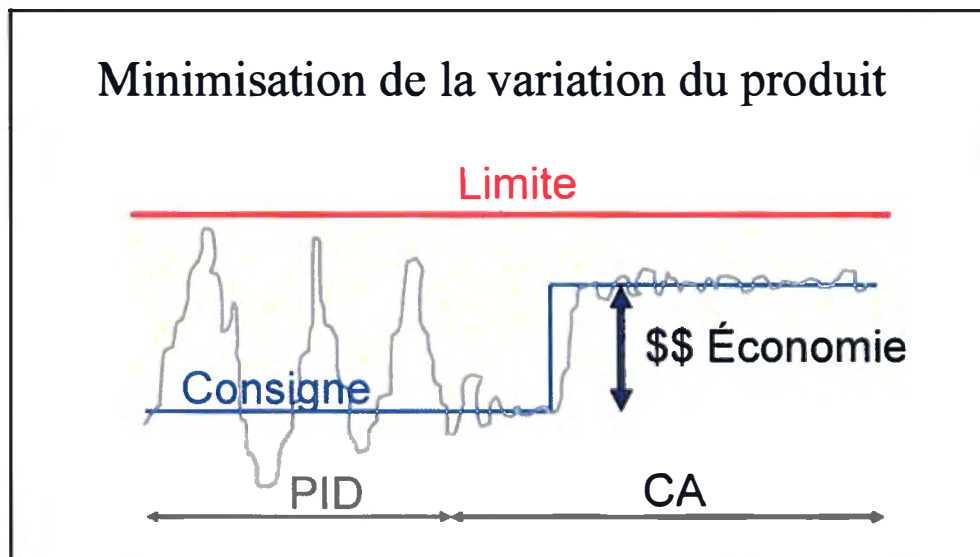


Figure 1.3 Comparaison entre le contrôle conventionnel et le CA

La figure 1.4 donne un exemple utilisant la variable énergie. Supposons que la limite maximale de CSF est de 200mL. Avec un contrôleur conventionnel, on suppose que le CSF du produit varie entre 190mL et 200mL (moyenne de CSF de 195mL), et que la moyenne de charge du moteur est de 35kW. Avec l'utilisation d'un contrôleur avancé, la variabilité des propriétés du produit est minimisée. On suppose ici que le CSF fluctue entre 194mL et 200mL (moyenne de CSF de 197mL), lequel est plus près de la limite de 200mL, et que la moyenne de charge du moteur est abaissée de 35kW à 33kW. Il en résulte un coût d'énergie réduit sans aucune modification physique au procédé.

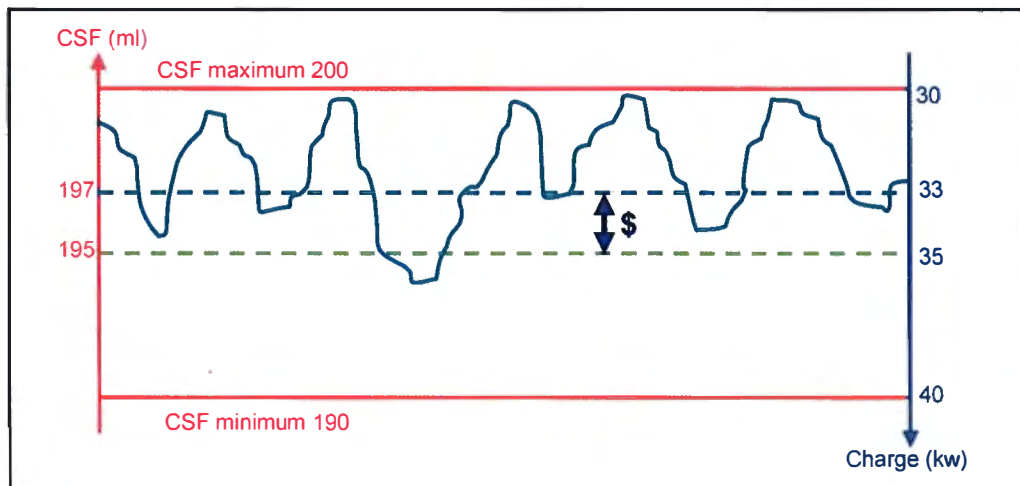


Figure 1.4 Contrôle avancé permettant une réduction de la consommation d'énergie

Avec un contrôle conventionnel (contrôle PID sans système de mesure des copeaux), les fluctuations dans les copeaux causent des variations sur la qualité de la pâte (la variation des copeaux est complètement reflétée sur le produit). Le contrôle des paramètres du procédé répond aux déviations du produit mais une certaine quantité de pâte non désirée a été produite. Le contrôle avancé permet pour sa part de prendre en compte les variations de qualité des copeaux. Dans ce cas, l'influence de ces variations sur la pâte est minimisée, donc la limite de fluctuation des propriétés du produit (i.e. CSF) est réduite. La moyenne de CSF visée peut alors être plus près de la limite maximale, réduisant ainsi la charge du moteur et entraînant un coût électrique moindre (figure 1.4).

La figure 1.5 présente le schéma de contrôle développé dans cette thèse. En gros, le CMS mesure les propriétés des copeaux, le modèle anticipe la qualité de la pâte et le contrôleur ajuste les variables manipulées du procédé (avant que les variations de qualité des copeaux n'affectent la qualité de la pâte) et minimise l'erreur entre la consigne et le résultat simulé (on présentera cette section en détail au chapitre 4).

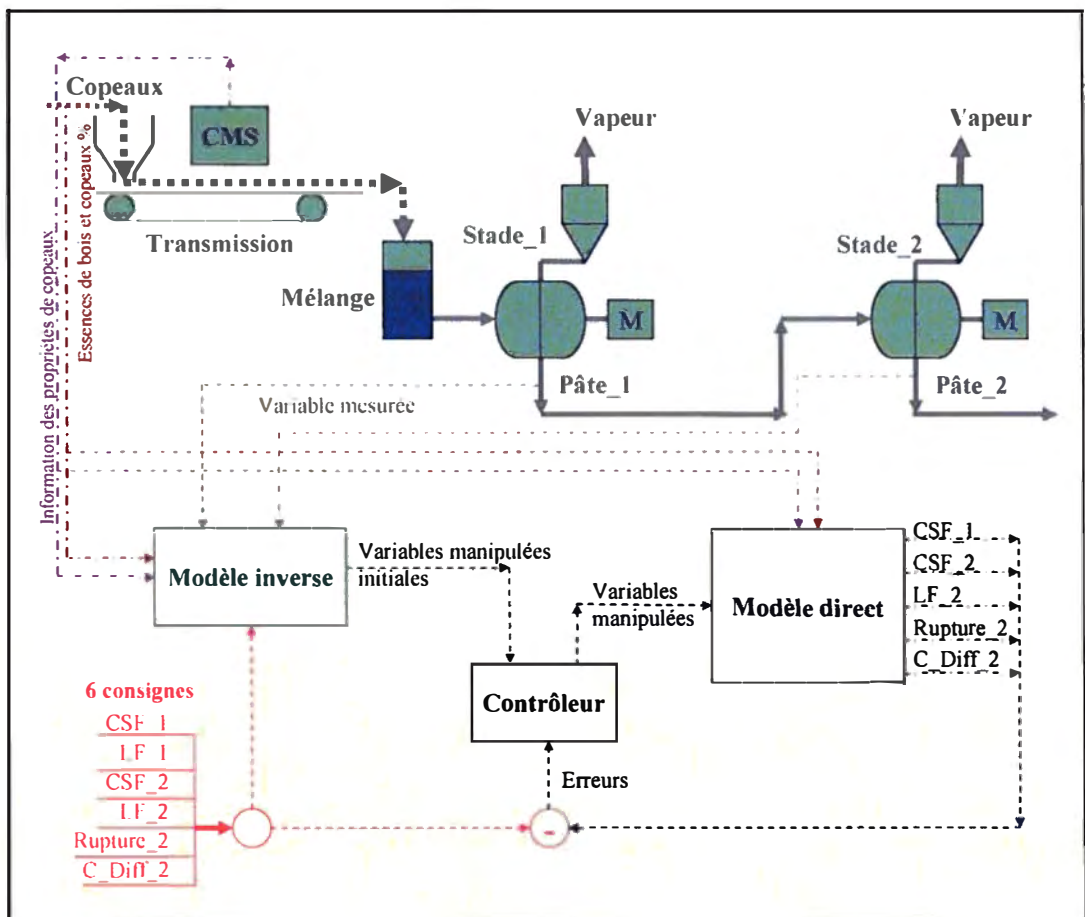


Figure 1.5 Esquisse du système de contrôle développé

Puisque la qualité des copeaux fait partie du modèle, on peut aussi lui associer des variables de procédé manipulées (la vitesse des vis de mélange) pour changer les mélanges et possiblement arriver aux mêmes avantages de réduction de variabilité de la pâte et permettre l'atteinte des points de consignes pour les 6 propriétés ciblées (CSF_1, CSF_2, LF_1, LF_2, Rupture_2 et C_Diff_2). La figure 1.6 montre le schéma de contrôle incluant les variables manipulées du mélange.

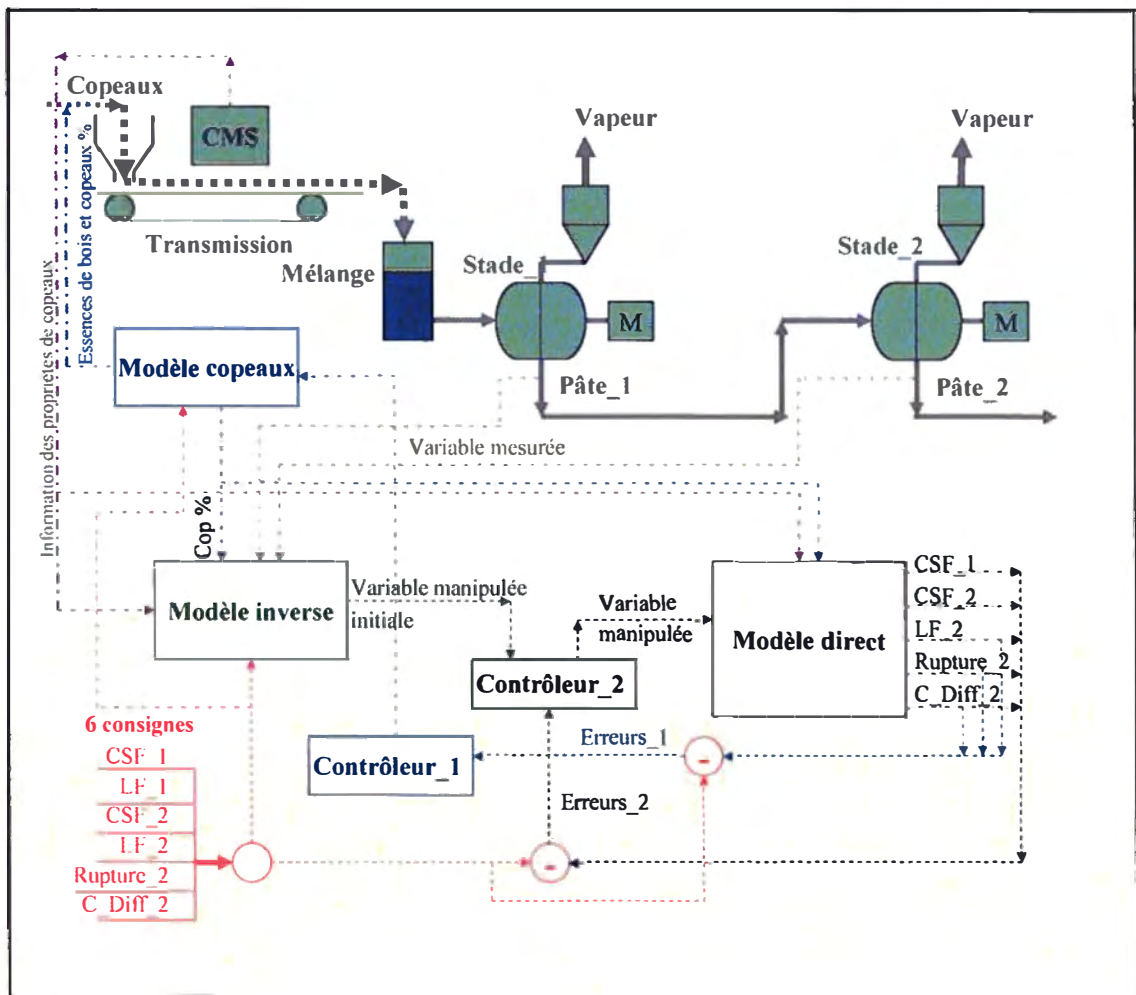


Figure 1.6 Esquisse du système de contrôle développé incluant une manipulation du mélange des copeaux

Chapitre 2 Revue de la littérature scientifique

La compréhension des phénomènes mis en cause dans le procédé de raffinage est un domaine de recherche très actif depuis près de 30 ans. Chaque année, de nombreux résultats sont publiés sur ce sujet. Dans ce chapitre, on présente et discute certains des résultats plus spécifiques sur la modélisation et le contrôle de ce procédé.

2.1 Modèles de fonctionnement d'un raffineur

En pratique, il existe de nombreux modèles du procédé de raffinage thermomécanique. On peut les diviser en trois catégories principales : les modèles mécanistiques, les modèles statistiques et les modèles d'intelligence artificielle.

2.1.1 Les modèles mécanistiques

Le modèle mécanistique est construit à partir des lois de la nature, par exemple :

Deuxième loi de Newton (bilan de force) :

$$\sum \text{forces} = ma$$

Équation 2.1

où :

m : masse, kg

a : accélération, m/s^2

Le bilan de matière :

$$\text{Entrée} + \text{génération} - \text{sortie} - \text{consommation} = \text{accumulation}$$

Équation 2.2

Le bilan d'énergie (à partir du principe de la conservation de l'énergie):

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W$$

Équation 2.3

où:

U: énergie interne

E_k : énergie cinétique

E_p : énergie potentielle

Q : énergie thermique transférée au système

W : travail mécanique effectué sur le système (pièces mobiles + fluide)

On peut généralement modéliser mathématiquement un problème à partir des équations différentielles issues des lois ci-haut [30].

Il existe de nombreux articles sur les modèles mécanistiques, tels que : nombre total d'impacts des lames sur les fibres et le temps de séjour de la pâte dans les plaques de raffineur [31], la relation entre l'énergie consommée et la qualité du bois [32], l'intensité de raffinage [33], la quantité d'énergie transformée en vapeur dans les plaques de raffineur [34], une simulation dynamique du procédé PTM [35].

À partir du calcul des forces qui gouvernent le débit de pâte (figure 2.1), Miles et May [36] ont dérivé une série d'équations pour calculer la vitesse radiale de la pâte dans un raffineur de copeaux à consistance élevée (de 18 à 30%), le temps de séjour de la pâte et l'intensité énergétique engendrée par les impacts des barres.

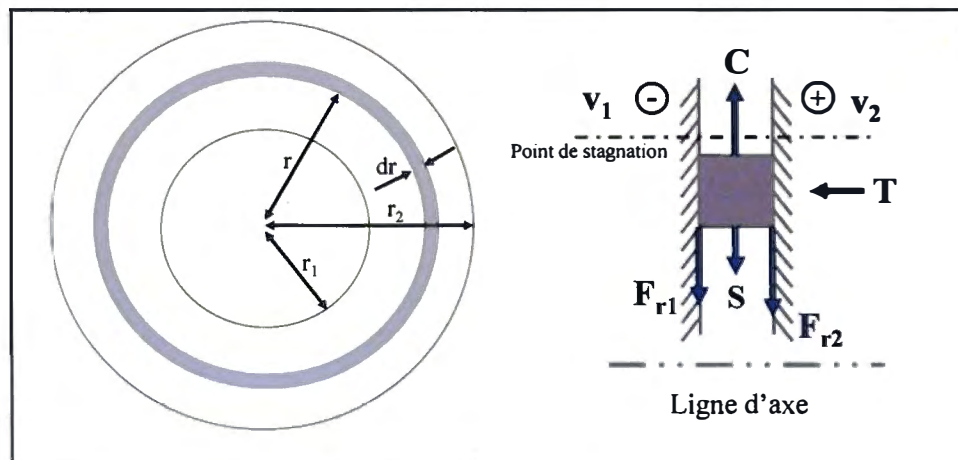


Figure 2.1 Modèle mécanistique d'un élément de pâte entre les plaques

Le calcul des forces qui gouvernent le débit de pâte est :

$$F(r) = C - F_{r1} - F_{r2} + bS \quad \text{Équation 2.4}$$

où:

C : *force centrifuge*

$F(r)$: *force totale à r*

F_{ri} : *force à r_i*

b : *+1 vapeur avance, -1 vapeur recule*

S : *force générée par la vapeur, 0 au point de stagnation*

Le changement de vitesse de la pâte dans la zone de raffinage est :

$$\frac{dv}{dr} = \frac{r\omega^2}{v} - a \frac{\mu_r}{\mu_{t1}} \frac{Ec(r)}{\omega(r_2^2 - r_1^2)} \quad \text{Équation 2.5}$$

où :

v : *vitesse radiale au rayon r ;*

ω : *vitesse angulaire;*

μ_r : *moyenne arithmétique des deux coefficients de friction radiaux;*

μ_{t1} : *coefficient de friction tangentiel;*

E : *énergie spécifique de raffinage;*

$c(r)$: *consistance au rayon r ;*

r_1, r_2 : *rayon interne et le rayon externe;*

a : *4 pour un raffineur à simple disque, 2 pour les raffineurs à doubles disques*

Le temps de séjour « τ » de la pâte entre les plaques peut être calculé par :

$$\tau = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{v} \quad \text{Équation 2.6}$$

L'intensité de raffinage « e » engendrée par les impacts d'une barre est :

$$e = \frac{E}{n} \quad \text{Équation 2.7}$$

où:

E : l'énergie spécifique totale

\bar{n} : le nombre moyen de barres par unité de longueur d'arc

Les équations de 2.4 à 2.7 montrent que l'intensité est entre autre gouvernée par l'énergie spécifique et la consistance. Cette dernière affecte le temps de séjour car la force centrifuge est influencée par la consistance.

Basé sur l'équation 2.6, dans un autre article de Miles et Karnis [37], les propriétés physiques et optiques des fibres sont déterminées par les valeurs de « n » et « e ». Une équation est dérivée pour calculer le nombre total d'impacts « n » qu'une fibre peut subir pendant son passage dans le raffineur et l'énergie de chaque impact :

$$n = \int_{r_1}^{r_2} N r \omega dr \quad \text{Équation 2.8}$$

où:

N : le nombre de barres par unité de longueur de l'arc

L'énergie spécifique totale est obtenue par:

$$E = \tau e' \quad \text{Équation 2.9}$$

où :

e' : puissance spécifique de raffinage

τ : temps de séjour

Cette équation permet de calculer l'énergie spécifique totale en fonction du temps de séjour.

Les résultats montrent que le nombre de stades n'affecte pas la qualité de la pâte. Si l'énergie appliquée « E » est fixée, alors en augmentant le nombre d'impacts « n » l'intensité de raffinage « e » sera réduite et la force de la pâte sera augmentée. Augmenter la vitesse de rotation revient à augmenter « e » ce qui produit l'effet inverse donc une force moindre, un taux de génération des fines plus élevé et un CSF diminué.

Qian et Tessier ont développé un modèle mathématique pour un procédé de raffinage thermomécanique [38] en deux stades. Dans le modèle de raffineur, les variables sont divisées en plusieurs groupes, comme montré à la figure 2.2.

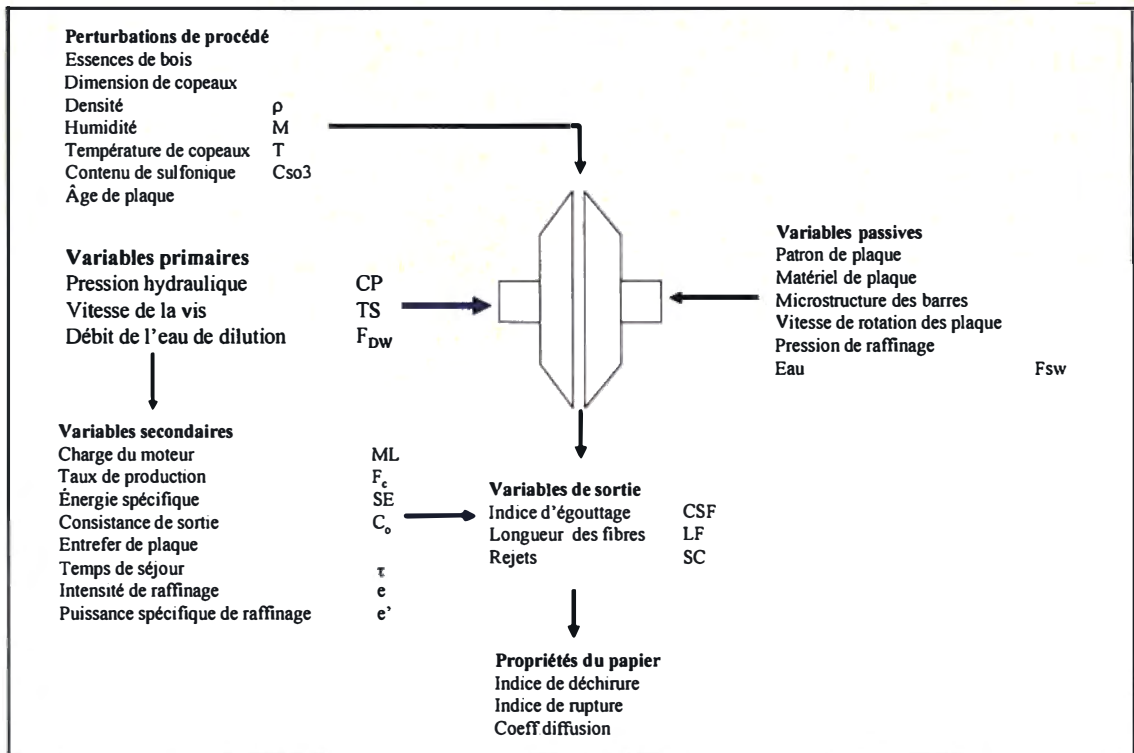


Figure 2.2 Variables du modèle mécanistique de Qian et Tessier

Les variables primaires présentent les variables manipulées du procédé qui peuvent être ajustées par le système de contrôle ou par l'opérateur. Les variables secondaires sont calculées à partir des variables primaires.

Le taux de production F_c est ajusté par la vitesse de la vis d'alimentation T_S . Un facteur proportionnel k_1 est utilisé pour relier la vitesse de rotation des plaques et le taux de production. Le taux de production peut être calculé par la densité ρ et la vitesse de la vis :

$$F_c = k_1 \rho T_S \quad \text{Équation 2.10}$$

La charge du moteur ML peut être obtenue par la pression hydraulique CP et le taux de production F_c .

$$ML = k_1 CP + k_2 F_c \quad \text{Équation 2.11}$$

où:

k_1, k_2 : coefficients linéaires (données de l'usine) entre ML , CP et F_c

L'énergie spécifique est calculée par :

$$SE = ML / F_c \quad \text{Équation 2.12}$$

Pour calculer l'énergie spécifique de chaque impact e , on peut utiliser l'équation suivante:

$$e = SE / N \quad \text{Équation 2.13}$$

où :

N : total nombre d'impacts, proportionnel au temps séjour τ

$$N = n h \omega [(r_1 + r_2) / 2] \tau \quad \text{Équation 2.14}$$

où:

h : 1 pour un raffineur simple disque, 2 pour un raffineur à double disques

n : le nombre de barres par unité de longueur d'arc

ω : la vitesse angulaire

L'équation suivante est utilisée pour prédire le CSF :

$$\text{CSF} = [\text{CSF}_0 - k_4 (\text{SE} - \text{SE}_0)] \times 10^{-K_5 (E - E_0)} + k_6 \text{Cso}_3 \quad \text{Équation 2.15}$$

où:

CSF_0 SE_0 E_0 : correspondant au point d'opération normal, dépendamment du procédé de raffinage et des caractéristiques des copeaux

Cso_3 : contenu en groupements sulfoniques dans le bois

Les résultats simulés montrent que l'énergie spécifique et le taux de production sont les deux variables les plus importantes pour contrôler les propriétés du papier.

Lama, Perrier et Stuart ont présenté un modèle de raffinage thermomécanique [39]. Ce modèle est utilisé dans un procédé de raffinage en 2 stades. Le modèle est basé sur les équations de bilan et les données d'une usine, pour prédire le taux de production F_c , la charge du moteur ML , l'énergie spécifique SE , le temps de séjour τ , la puissance spécifique spw , l'intensité de raffinage RI , les consistances d'entrée et de sortie C_i , C_o , le contenu de rejets SV , le contenu en fibre longues CLF et l'indice d'égouttage CSF . Les variables d'entrée du modèle sont : la vitesse d'alimentation tss , la pression hydraulique P_c et la dilution pour les deux stades F_{dv} , l'humidité de copeaux M et les proportions p des essences différentes de bois, tels que : épinette noire / sapin baumier HD , pin gris PG et bois dur HW .

La charge du moteur ML est calculée par une équation empirique :

$$ML = e^{a+b \ln(tss) + c \ln(P_c) + d \ln(F_{dv})} \quad \text{Équation 2.16}$$

où:

a , b , c , d : les constantes déterminées par l'opération et les caractéristiques du raffineur.

Cette équation est dérivée du modèle linéaire développé par Qian et Tessier [38] mais inclus des éléments non linéaires, par exemple tss, Pc et Fdv.

La variation de la densité des copeaux est une des plus importantes perturbations du procédé PTM. Le calcul du taux de production doit inclure cette variation :

$$F_c = 1,44 * K_c * tss * \rho \quad \text{Équation 2.17}$$

où:

F_c : Taux de production, en tonnes/jour

tss : vitesse de rotation en RPM

K_c : constante déterminée expérimentalement, en m³/rev

La densité ρ peut être calculée par l'équation 2.18.

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{D_i} \quad \text{Équation 2.18}$$

où :

D_i : kg/m³, est la densité d'une essence

P_i : proportion d'une essence

Les résultats obtenus montrent que tss est la plus importante variable pour contrôler ML. Pour sa part, Pc affecte largement l'énergie spécifique. L'article montre finalement que les fibres longues sont mieux contrôlées dans le stade 1 et le CSF est plus facile à contrôler sur le stade 2.

Bien que les équations mathématiques puissent être utilisées dans les modèles mécanistiques pour calculer les variables manipulées du procédé, telles que la vitesse radiale, la charge de moteur, le taux de production, etc., on peut aussi calculer le temps de séjour et trouver la relation entre le temps de séjour et les propriétés des pâtes. Pour utiliser ces équations dans un système de contrôle pendant l'opération, il faut obtenir les

facteurs utilisés dans cette équation. Parfois il est difficile de mesurer dynamiquement et exactement certains facteurs en ligne, par exemple, l'écoulement de la vapeur, de la pâte et la distribution de consistance entre les plaques. Même si on pouvait mesurer ces facteurs en ligne, l'installation des appareils de mesure correspondants dans une usine ne serait probablement pas économique. De plus, même si certains des modèles incluent les caractéristiques des copeaux, ces dernières ne sont pas mesurées en ligne et sont donc considérées comme des constantes.

2.1.2 Les modèles statistiques

La statistique est une discipline mathématique de grande importance qui permet de modéliser à partir d'observations expérimentales. La plus grande différence entre le modèle mécanistique et le modèle statistique est que le modèle statistique est basé sur les données expérimentales plutôt que des lois fondamentales. Un modèle statistique couvre généralement une plage plus restreinte de conditions d'opérations, par contre ce type de modèle est généralement plus facile à développer. En pratique, on utilise essentiellement trois méthodes: régressions et surfaces de réponse à partir d'un plan expérimental [40,41, 42,43], l'analyse multivariées par composantes principales (PCA) [44] et la projection sur une structure latente (PLS) [45].

2.1.2.1 Régressions

La plus connue est la régression linéaire. Pour le premier degré et le second degré, on peut utiliser les équations suivantes:

$$Y = b_0 + b_1X \quad \text{Équation 2.19}$$

$$Y = b_0 + b_1X^2 \quad \text{Équation 2.20}$$

où :

Y : la variable (réponse) dépendante;

X : la variable (donnée) indépendante;

b₀, b₁ : les coefficients de la régression.

La régression factorielle est pour sa part utilisée pour considérer les possibilités de combinaison entre les variables de prédiction. Par exemple, pour deux variables de prédiction X_1 et X_2 , l'équation de régression factorielle peut être présentée par :

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1 * X_2 \quad \text{Équation 2.21}$$

La régression polynomiale contient les effets principaux et les effets d'ordre supérieur pour les variables de prédiction continues mais elle n'inclut pas les effets d'interaction entre les variables de prédiction. Par exemple, pour 2 degrés à 3 variables de prédiction continue P, Q et R, on peut utiliser l'équation suivante :

$$Y = b_0 + b_1 P + b_2 P^2 + b_3 Q + b_4 Q^2 + b_5 R + b_6 R^2 \quad \text{Équation 2.22}$$

La réponse de surface est basée sur les concepts de la régression polynomiale et de la régression factorielle. Elle peut être représentée par l'équation suivante pour 3 variables de prédiction continue P, Q et R:

$$Y = b_0 + b_1 P + b_2 P^2 + b_3 Q + b_4 Q^2 + b_5 R + b_6 R^2 + b_7 P * Q + b_8 P * R + b_9 Q * R \quad \text{Équation 2.23}$$

Dans l'article de Garceau et Jones, des régressions ont été utilisées pour prédire quatre propriétés des pâtes (Indice de rupture, Indice de déchirure, Longueur de rupture et Fraction de 28-mesh) Le modèle peut prédire à $\pm 16\%$ les valeurs testées avec un intervalle de confiance de 95% [46].

Les coefficients de corrélation ont été calculés pour 20 variables étudiées en 24 séries de données. Les paires de variables présentant un coefficient de corrélation supérieur à 0,6 représentent les relations significatives. Les deux régressions suivantes permettent de prédire l'indice de rupture et l'indice de déchirure :

$$Y_1 = -0,0027X_1 - 0,067X_2 + 0,12X_3 + 0,21X_4 + 0,1X_5 + 0,0025X_8 + 0,4X_{11} - 1,7 \quad \text{Équation 2.24}$$

$$Y_2 = -0,0059X_1 - 0,53X_2 + 0,46X_3 + 0,92X_4 + 0,36X_5 - 6,8X_7 + 0,025X_8 - 13,9 \quad \text{Équation 2.25}$$

où:

Y_1 : indice de rupture $\pm 16\%$

Y_2 : indice de déchirure $\pm 16\%$

X_1 : *taux de production*

X_2 : *énergie spécifique de raffinage (stade 2)*

X_3 : *énergie spécifique de raffinage (total)*

X_4 : *consistance, % (stade 1)*

X_5 : *consistance, % (stade 2)*

X_7 : *rejets, %*

X_8 : *débit d'alimentation du tamis primaire, USGPM*

X_{11} : *sciures, %*

2.1.2.2 Composantes principales (PCA)

Afin de superviser et contrôler un procédé papetier, il y a parfois beaucoup de variables d'entrées et de sorties qui doivent être analysées et surveillées simultanément. Dans ce cas, on peut utiliser la technique d'analyse par composantes principales PCA pour extraire l'information et diminuer la dimensionnalité des données originales, et se limiter aux variables importantes ou à un regroupement de variables qui devient important. La figure 2.3 montre 3 composantes principales PC1, PC2 et PC3, dans 3-dimensions x_1 , x_2 et x_3 .

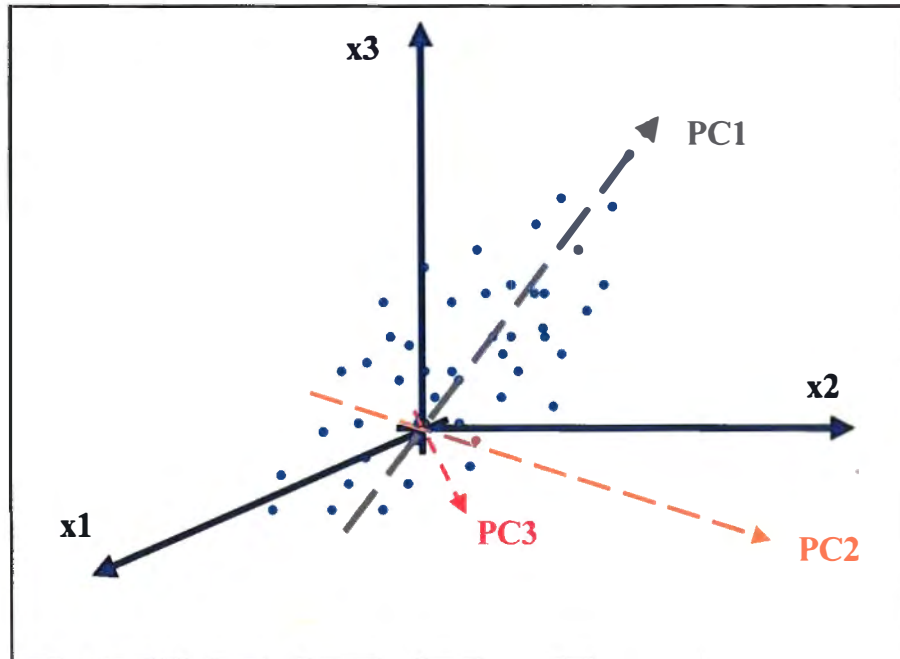


Figure 2.3 Trois composantes principales dans le modèle PCA

PC1 est la première composante principale, et donc c'est dans cette direction que les données ont une plus grande variation. PC2 et PC3 sont la seconde et la troisième composante principale, respectivement. Les données ont de moins en moins de variation dans les directions allant de PC1 à PC2 et de PC2 à PC3. On remarque aussi que les trois directions sont orthogonales.

Une analyse PCA demande une étape de normalisation des données. La figure suivante présente ce prétraitement.

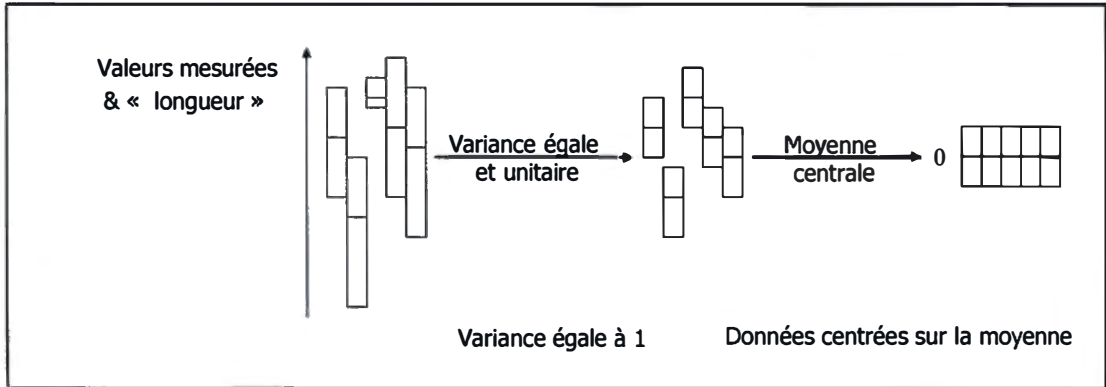


Figure 2.4 Prétraitement des données

Une première étape consiste à normaliser la variance des variables, suivie d'une normalisation des moyennes. Le but est d'uniformiser les plages de variations des variables pouvant par exemple provenir des unités d'ingénieries différentes ou des erreurs de manipulations plus importantes sur certaines variables comparativement à d'autres. La figure ci-dessous montre un exemple de données avant et après le prétraitement.

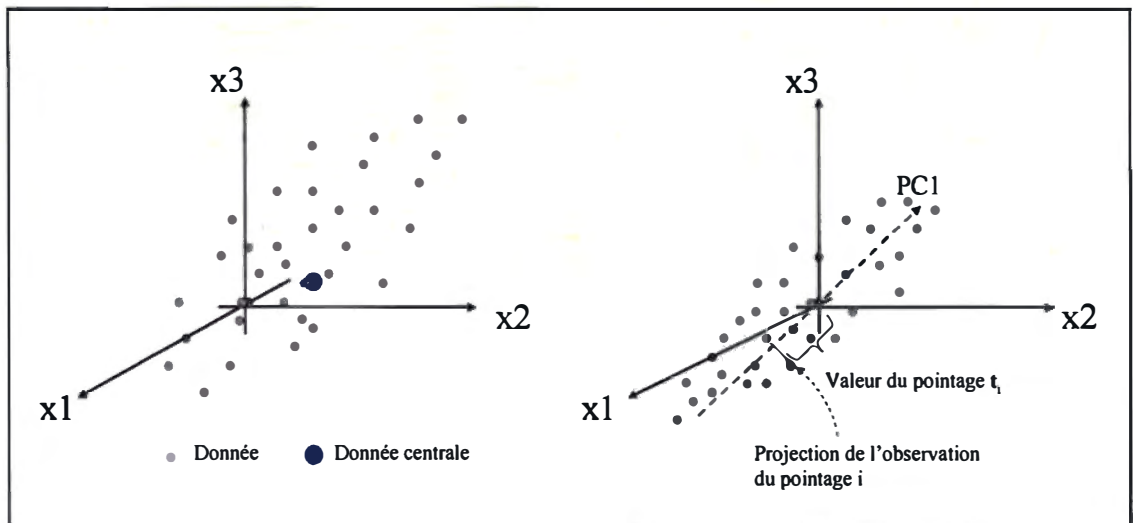


Figure 2.5 Données avant et après le prétraitement

Sundström, Tönnesen et Nilsson présentent un modèle multivariables qui peut mesurer et analyser la perturbation des copeaux et contrôler le procédé PTM [47]. Quatre essences de copeaux différentes ont été raffinées dans 2 usines. Pendant l'opération, les copeaux sont échantillonnés aux 15 minutes et sont ensuite classifiés. Après avoir

mesurer la longueur, la largeur et l'épaisseur des copeaux, les échantillons sont divisés en 8 groupes (de composition différente). Ensuite, les propriétés de copeaux, les paramètres de procédé et la qualité des pâtes sont analysés par la méthode PCA. Dans ce cas, on peut trouver les relations parmi les copeaux différents, le procédé de raffinage et la qualité de la pâte.

Un modèle PCA à deux composantes principales a été construit. La figure 2.6 montre que les 4 types de copeaux sont bien séparés, c'est à dire que l'influence de chaque groupe de copeaux est clairement différente. On remarque que les copeaux de petite dimension (de 3 à 5 mm) qui se trouvent autour du centre du plan de projection (à la droite de la figure 2.6) affectent faiblement les propriétés des pâtes.

La figure 2.7 présente les résultats analysés. On voit que la charge de moteur, l'entrefer, la vitesse de rotation et la température sont plus loin du centre de projection, c'est-à-dire que ces paramètres sont influencés plus fortement par les 4 types des copeaux.

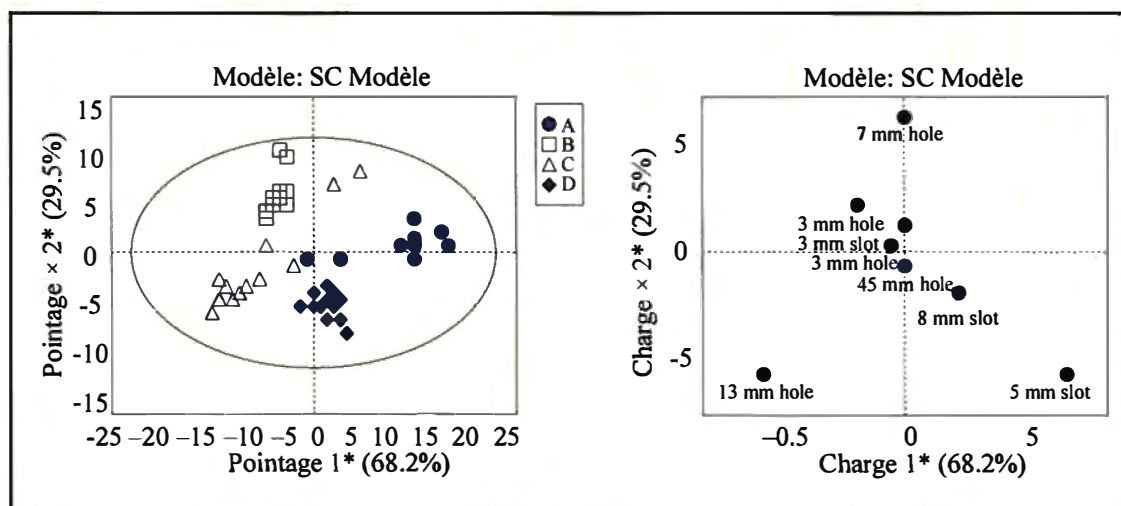


Figure 2.6 Pointage (gauche) et charge (droite) basés sur 8 fractions de copeaux

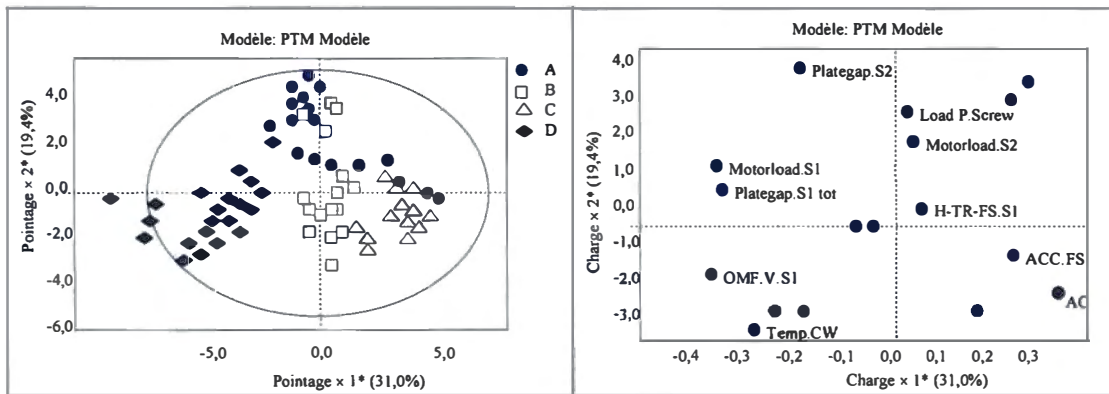


Figure 2.7 Pointage et charge pour explorer l'influence des copeaux sur le procédé de raffinage

L'analyse expérimentale montre aussi que les copeaux peuvent causer 10% de variation sur l'énergie spécifique au premier stade, ce qui peut affecter les propriétés de pâte. Il y a finalement une grande relation entre la densité des copeaux et la première composante principale.

2.1.2.3 Projections sur une structure latente (PLS)

Les modèles PLS sont une extension du modèle de régression multiple linéaire et de la méthode PCA, et sont utilisés pour connecter l'information des deux blocs de variables, X et Y (figure 2.8). Autrement dit, la méthode PLS est une méthode pour relier deux matrices de données, X (les variables d'entrée) et Y (les variables de sortie), par un modèle linéaire multivariées. Les PLS projettent les données sur une structure latente (calculée par une régression de moindres carrés partiels). Comme les PCA, les PLS font aussi l'objet d'un pré-traitement des données.

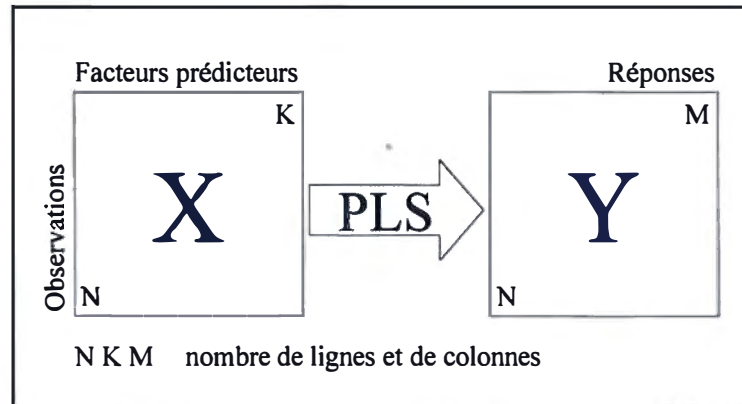


Figure 2.8 Méthode PLS faisant la relation entre deux matrices de données

Pour comprendre facilement le principe des PLS, la figure 2.9 présente un cas avec une seule réponse Y .

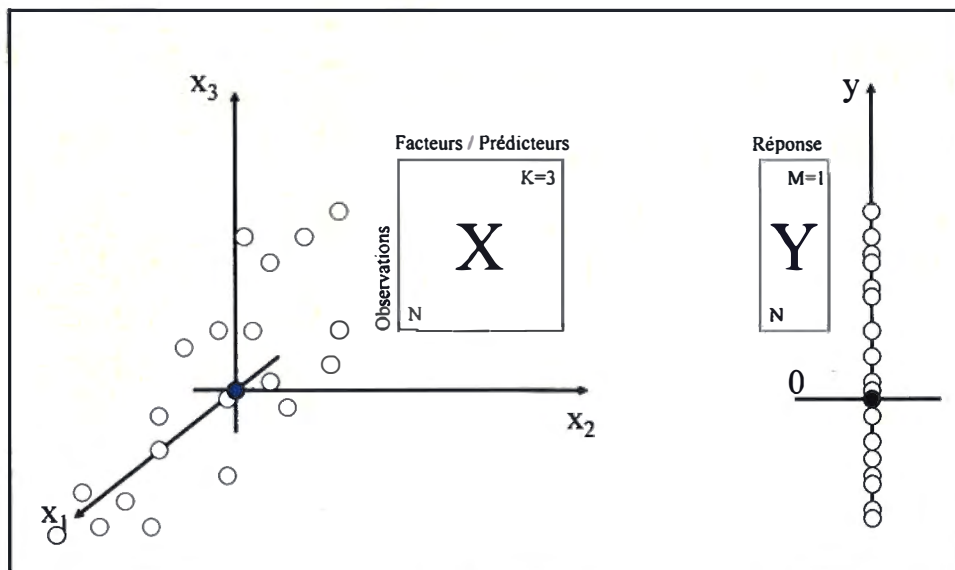


Figure 2.9 Une régression de la réponse Y et du prédicteur X dans PLS

La première composante du PLS décrit le nuage des points dans X et en même temps donne une bonne corrélation avec Y . Les projections des observations sur un axe dans l'espace des X donne le pointage de chaque observation selon cet axe. Ces projections sont les nouvelles coordonnées des observations selon cet axe et elles forment le vecteur t_1 . Un modèle d'estimation des Y selon la première composante est obtenu en multipliant t_1 avec une pondération du vecteur y , notée c_1 . Pour la seconde composante

PLS, la seconde projection des X selon une direction orthogonale à la première est utilisée. Les observations projetées sur ce nouvel axe donnent un vecteur \mathbf{t}_2 avec une pondération des Y notée \mathbf{c}_2 . Les deux vecteurs latents définissent un plan dans l'espace des X.

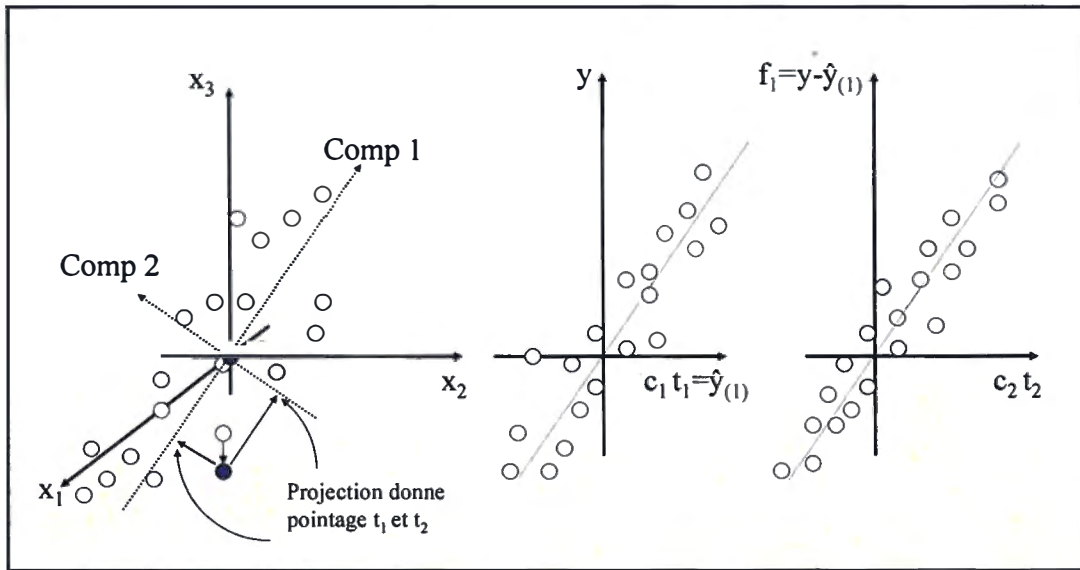


Figure 2.10 Projections des variables X et Y dans l'espace des X et des Y

La figure 2.11 illustre les résidus de Y du modèle PLS avec 2 vecteurs latents.

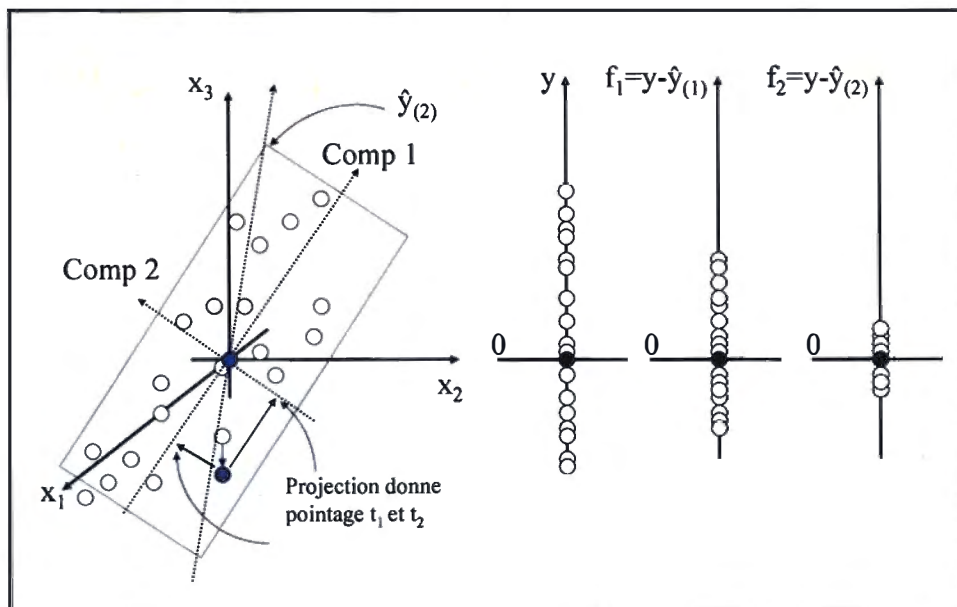


Figure 2.11 Résidus du modèle PLS à 2 vecteurs latents

Le vecteur \mathbf{f}_1 est obtenu en soustrayant les valeurs projetées des valeurs réelles, $\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}_{(1)}$. Sur la figure, on voit que ce vecteur résiduel est plus court que les observations initiales \mathbf{y} (vecteur parent). Ceci implique que la première composante PLS a capturé une grande partie de la variation dans \mathbf{y} . De façon similaire, le vecteur \mathbf{f}_2 résiduel est plus court que \mathbf{f}_1 et donc une partie de la variation est également attribuable à la seconde projection.

Harrison, Leroux et Stuart ont utilisé les deux types d'analyse multivariées PCA et PLS sur des moyennes quotidiennes, à l'aide de diverses combinaisons de variables [48]. Les variables du procédé en amont et en aval des raffineurs primaires et secondaires d'une usine de papier journal à base de pâte thermomécanique ont été mesurées durant 34 mois consécutifs. Les données analytiques sont les propriétés des copeaux (analysées en laboratoire, telles que la densité, l'humidité, la distribution dimensionnelle), les variables d'opération du raffineur (l'énergie spécifique, la répartition de l'énergie entre les étages 1 et 2, l'entrefer, le taux de dilution, la température, la pression, le débit de vapeur, la vitesse d'alimentation, la consommation d'hydrosulfite), les paramètres de l'équipement (l'heure de l'opération, le nombre de raffineurs, la température du bâti du raffineur), la qualité de la pâte (analysées automatiquement en ligne dans le réservoir de latence de la ligne 1, incluant la distribution de longueur des fibres, le CSF, la consistance et la blancheur) et la saison (représentée par la moyenne mensuelle de la température).

Les méthodes PCA et PLS sont utilisées pour analyser l'ensemble des données. Les résultats montrent qu'il y a seulement une composante principale des copeaux reliée significativement à la saison. En été, les copeaux de 5/8 po ont une grande relation; en hiver, trois variables sont plus importantes : la présence de copeaux de la fraction 3/8 po, la densité et l'humidité.

Pour la qualité du papier, il existe une grande relation entre les différentes fibres (proportion et dimensions) et les caractéristiques du papier (telles que la perméabilité, l'intensité, la rupture et la déchirure). Avec un modèle PCA à 2 composantes principales les données significatives de l'opération du raffinage ont pu être sélectionnées. La première composante a une grande corrélation avec les saisons et les propriétés des

pâtes. La blancheur est plus élevée en été, la consommation d'agent de blanchiment est plus haute en hiver.

La figure 2.11 présente les relations entre la dimension des copeaux, l'état du procédé et la saison.

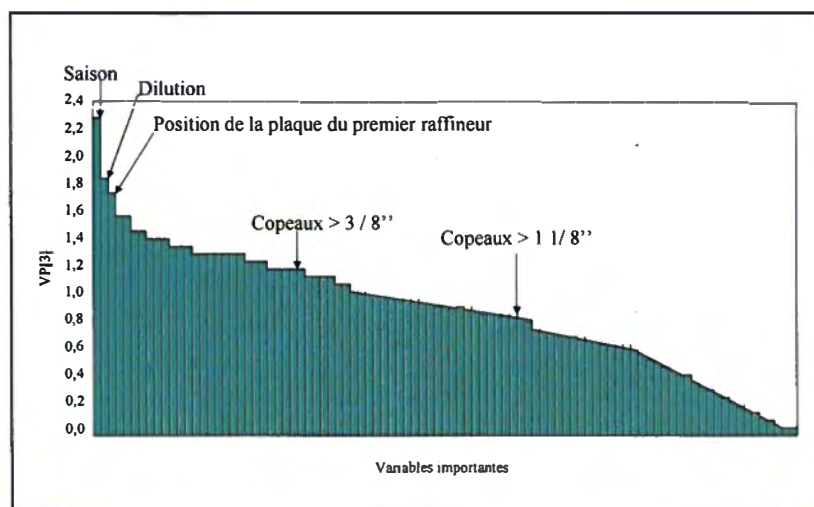


Figure 2.12 Les variables importantes du modèle PLS

2.1.3 Les modèles d'intelligence artificielle

Dans le domaine des pâtes et papiers, plusieurs types de modèles d'intelligence artificielle ont été utilisés. Parmi eux, on dénombre trois techniques principales: les systèmes experts (SE) [49, 50]; la logique floue (LGFL) [51,52,53]; et les réseaux de neurones (NN) [54,55,56,57,58].

2.1.3.1 Systèmes Experts (SE)

Le SE tient compte de deux niveaux d'abstractions : les données (database) et les savoirs (knowledge base). Les savoirs sont représentés sous forme de règles « if (données) » « then (nouvelles données) ». Une inférence est générée par l'application des règles sur les données (côté « if » de la règle ou prémisse) pour ainsi générer de nouvelles données (côté « then » de la règle ou conclusion). L'engin d'inférence est une technique algorithmique qui détermine quelles règles sont appliquées et dans quel ordre (enchaînement direct, enchaînement inverses, algorithme A*, etc). Dans un SE, les

données d'entrées peuvent être incomplètes, inconsistantes ou incorrectes. Puisqu'un système expert est basé sur les règles qui contiennent le savoir et l'expertise, si le problème n'est pas dans la limite reflétée par les règles, alors le système expert est inadéquat à générer une réponse. De plus, un système expert est généralement limité quant à sa capacité de modéliser mathématiquement des relations entre les variables, par exemple au niveau du contrôle dynamique du procédé. La figure suivante montre la structure générale d'un système expert.

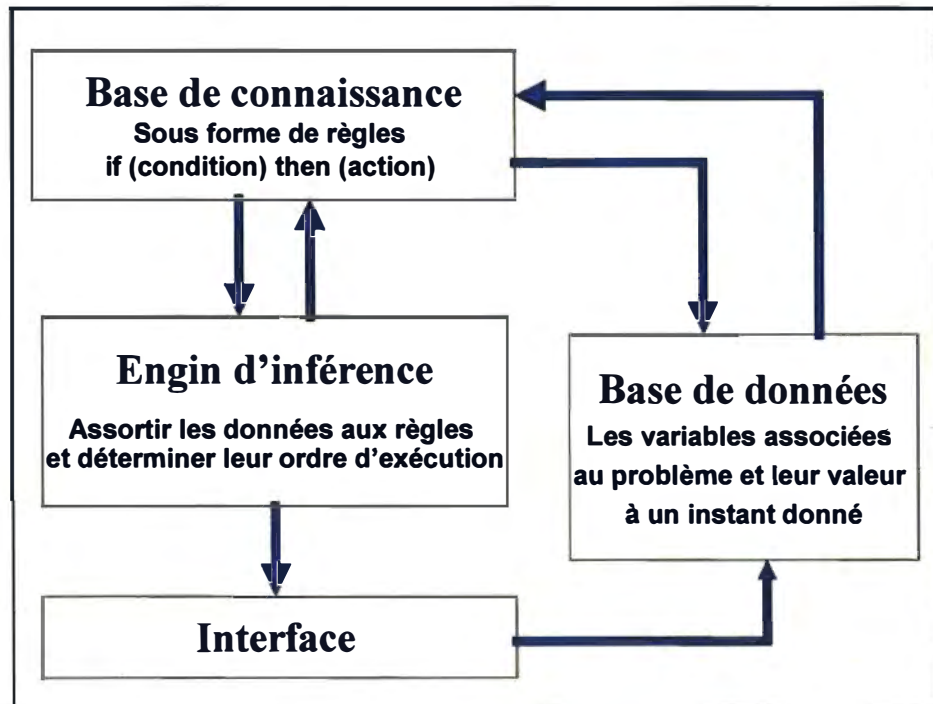


Figure 2.13 Structure d'un système expert

2.1.3.2 Logique Floue (LGFL)

Un concept important dans la LGFL implique les variables linguistiques. Une variable linguistique est le nom d'une série floue. Une variable linguistique (marqueur) telle que "O₂Normal" peut être définie précisément par l'utilisation d'une fonction de sociétariat (Figure 2.14). Cette fonction arrange toutes les valeurs possibles d'une variable linguistique d'entrée (les valeurs sont généralement entre 0,0 et 1,0). La sortie de la fonction est une variable floue avec la marque "O₂Normal". Dans l'exemple ci-dessous, si O₂ est moins que 1,5%, alors la sortie marquée « O₂Normal » sera zéro (0,0). Si O₂

augmente, la sortie « O₂Normal » augmentera aussi et atteindra la valeur de 1.0 lorsque O₂ est entre 2,5% et 3,5%. Si O₂ continue à augmenter, la sortie « O₂Normal » diminue et retombe à 0,0 quand O₂ est à 4,5%. La sortie reste à 0,0 pour la valeur d'entrée de O₂ au-dessus de 4,5%. On peut voir la logique floue comme un système expert pour lequel les règles ont des probabilités qui leur ont été associées par la fonction de sociétariat. Par comparaison avec un modèle mécanistique ou statistique, le modèle de logique floue permet de choisir logiquement des valeurs nuancées, donc le contrôle du procédé devient plus flexible, moins rigide. Les contraintes du problème à modéliser sont alors considérées comme "flottantes".

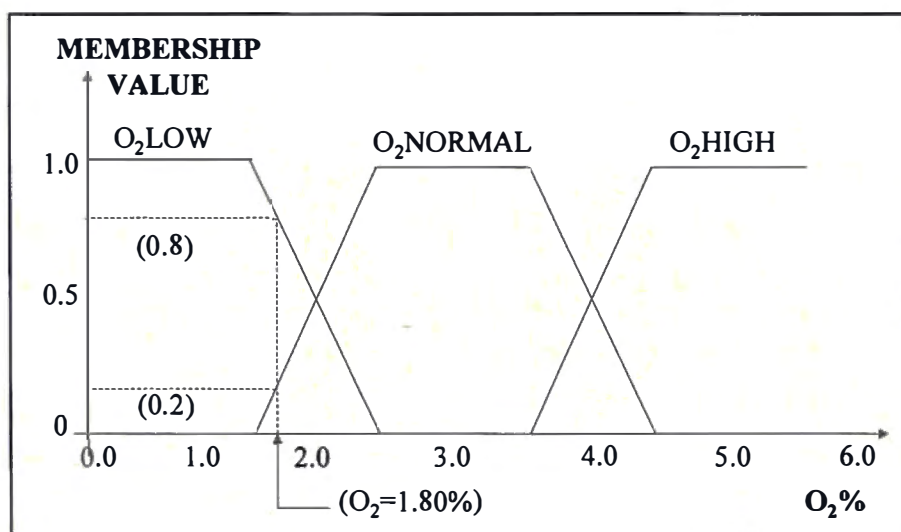


Figure 2.14 Représentation de termes linguistiques d'une logique floue

Basé sur les savoirs empiriques, Qian, Tessier et Dumont ont développé un modèle de logique floue pour contrôler un procédé de raffinage thermomécanique [59]. Combiné à un algorithme d'optimisation, le modèle de logique floue peut minimiser la consommation d'énergie tout en maintenant la qualité de la pâte dans une limite acceptable ou optimiser les propriétés des pâtes dans la plage d'opération du raffineur. Une série d'équations (approximatives et empiriques) est utilisée pour représenter les interactions entre les caractéristiques des copeaux (essence de bois, densité de copeaux, distribution de la dimension de copeaux, humidité de copeaux), les propriétés intrinsèques des fibres (résistance des fibres, rugosité des fibres, longueur moyenne des

fibres, distribution de la longueur des fibres, fraction de bûchettes, fines, CSF), les variables du procédé de raffinage (taux de production, énergie spécifique, entrefer, âge de plaque, consistance de raffinage, charge de moteur), les propriétés des pâtes et papiers (indice de déchirure, indice de rupture, densité de papier, coeff. diffusion, blancheur) et autres variables de procédé (température de copeaux, température de l'eau de dilution, patron de plate, vitesse de rotation, répartition d'énergie entre les stades 1 et 2).

La figure 2.15 présente les variables utilisées et les relations entre ces variables dans le modèle.

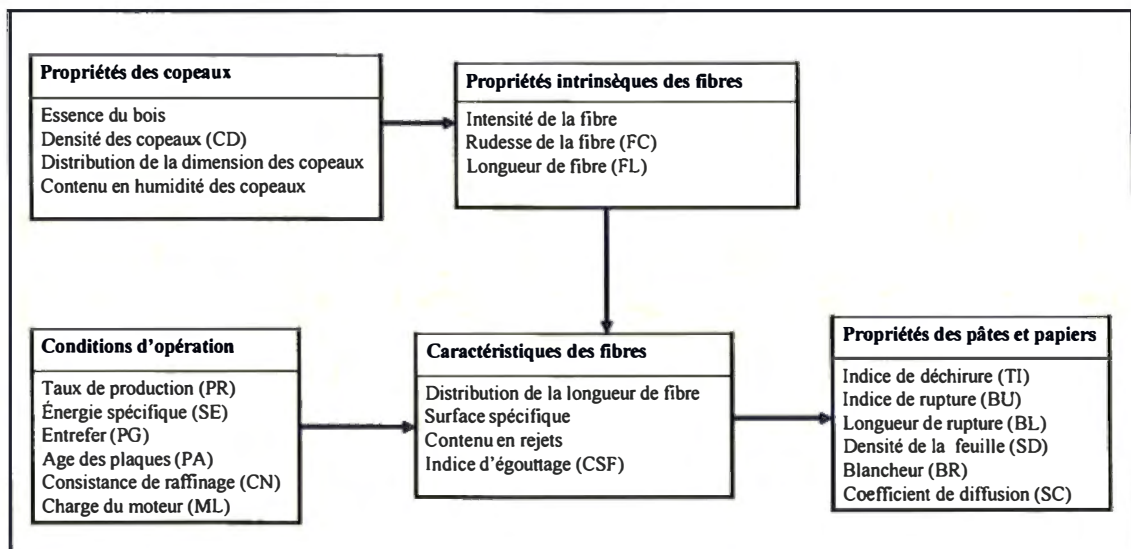


Figure 2.15 Interactions entre les différents groupes de variables utilisées dans le modèle de LGFL

L'équation 2.26 présente la définition d'un paramètre de la qualité du papier Q.

$$Q = (TI / 9)^{2/3} (BL / 8)^{1/3} (SC / 800)^{4/3} \quad \text{Équation 2.26}$$

L'équation 2.27 montre la forme des équations empiriques et approximatives qui décrit le savoir empirique de différentes sources:

$$f_i(x) \approx 0 \quad \text{Équation 2.27}$$

où:

$x = x_1, x_2, x_m$ une série de variables de procédé.

$i = 1, 2, N$

$N > m$

Les équations suivantes montrent des équations empiriques du procédé de raffinage.

$$\Delta PG = -0,78\Delta SE - 0,814\Delta PR - 4\exp(-5\Delta PA + 0,01\Delta CN) \quad \text{Équation 2.28}$$

$$\Delta CSF = -250\Delta SE - 104\Delta PR - 0,05\Delta PA \quad \text{Équation 2.29}$$

$$\Delta CSF = -200\Delta SE - 32\Delta PR \quad \text{Équation 2.30}$$

$$CSF = 1130\exp[-0,02 - 0,033FL[1 + (2 - 0,11CN)]SC] \quad \text{Équation 2.31}$$

$$TI = 0,103CD + 11,5FL - 57,9 \quad \text{Équation 2.32}$$

$$\Delta SD = -40,2\Delta FL - 0,58\Delta CD \quad \text{Équation 2.33}$$

$$\Delta SC = -0,56\Delta SD - 16,8\Delta FC \quad \text{Équation 2.34}$$

Après pondération de ces équations approximatives, il est possible de définir une fonction de sociétariat pour chaque équation comme suit :

$$\mu_i = \exp[-w_i f_i^2(X)] \quad \text{Équation 2.35}$$

où:

μ_i : fonction de sociétariat de 0 à 1;

w_i : facteur de crédibilité;

X : vecteur des variables de procédé non-dimensionnées.

Si $f_i(X) = 0$, alors la fonction de sociétariat μ_i est 1, ce qui illustre que l'équation f_i () s'adapte à un sociétariat entre les variables du système, lequel est représenté par X . Si une fonction de sociétariat est nulle, alors l'équation n'est pas désirée. Un total de 45 équations ont été pondérées. De ce nombre, la logique floue a permis de démontrer que

42 équations, dont la fonction de sociétariat variait entre 0.7 et 1, étaient plus pertinentes.

L'équation 2.36 définit la moyenne des équations de sociétariat.

$$\mu_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp(-w_i f_i^2(X)) \quad \text{Équation 2.36}$$

où :

μ_M : degré de floue du modèle.

Quand $\mu_M = 1$, le modèle est mathématiquement précis. Si $\mu_M < 1$, le modèle est imprécis ou conflictuel.

2.1.3.3 Réseaux de neurones

Un réseau de neurones est constitué de cellules ou neurones. Ces cellules sont reliées entre elles par des connexions, ce qui leur permet de disposer d'un canal pour envoyer et recevoir des signaux en provenance d'autres cellules du réseau. Chacune de ces connexions reçoit une valeur, un poids (une pondération en quelque sorte). Les cellules disposent d'une entrée, qui permet de recevoir de l'information d'autres cellules. Elle dispose aussi d'une fonction d'activation qui, dans le cas le plus simple, est une pondération du résultat obtenu par l'entrée. La figure 2.16 montre le modèle de neurone utilisé pour simuler les caractéristiques du premier ordre du neurone biologique. Une série d'entrées est appliquée pour le modèle, chaque entrée multiplie un facteur de pondération qui est analogue à l'intensité synaptique du neurone biologique. Les entrées pondérées sont totalisées pour déterminer le niveau d'activation du neurone.

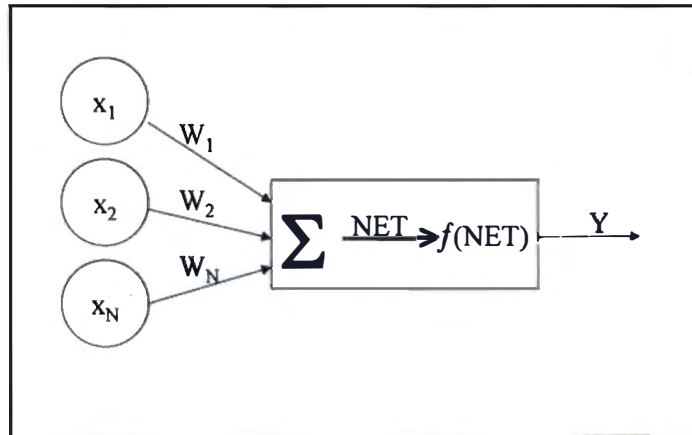


Figure 2.16 Modèle de neurone

La sortie y est une fonction des activations d'entrée pondérées ($x_1w_1, x_2w_2 \dots x_nw_n$) :

$$NET = \sum_{n=1}^N X_n W_n$$

Équation 2.37

Donc :

$$Y = f(NET)$$

Équation 2.38

où :

Y : la sortie d'un neurone ;

NET : somme pondérée ;

x_n : $n^{ième}$ entrée à un neurone ;

w_n : $n^{ième}$ pondération appliquée à la $n^{ième}$ entrée ;

$f()$: la fonction de transfert.

La figure 2.17 présente la structure d'un système des neurones artificiels avec trois niveaux (entrée, caché et sortie).

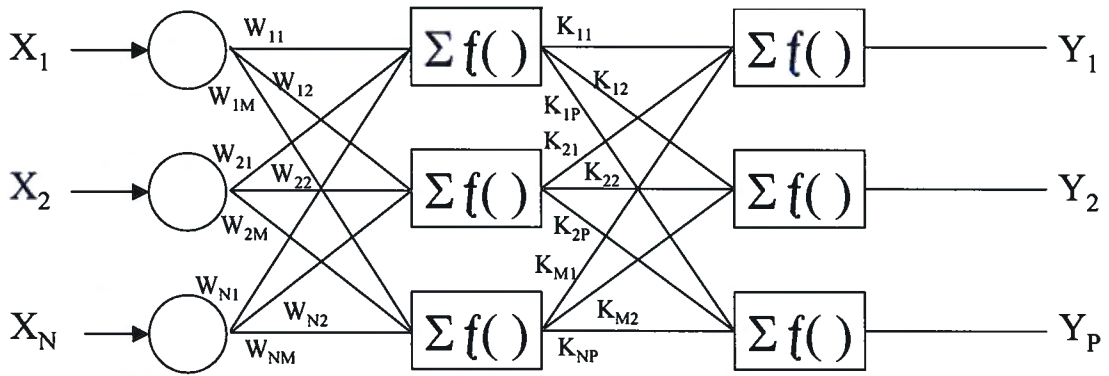


Figure 2.17 Système de neurones artificiels avec trois niveaux

Les sorties y peuvent être représentées mathématiquement par :

$$Y_p = f\left(\sum_{m=1}^M \left(f\left(\sum_{n=1}^N X_n W_{nm} \right) \right) \times K_{mp} \right)$$

Équation 2.39

où :

Y_p : la $P^{ième}$ sortie du réseau;

X_n : la $n^{ième}$ entrée du réseau;

W_{nm} : le $m^{ième}$ facteur de pondération appliqué à la $n^{ième}$ entrée au neurone;

K_{mp} : le $P^{ième}$ facteur de pondération appliqué à la $m^{ième}$ sortie du niveau caché;

$f()$: la fonction de transfert (i.e., sigmoïde, etc.).

Pour modéliser un phénomène, on entraîne les réseaux de neurones comme la figure 2.18 le montre.

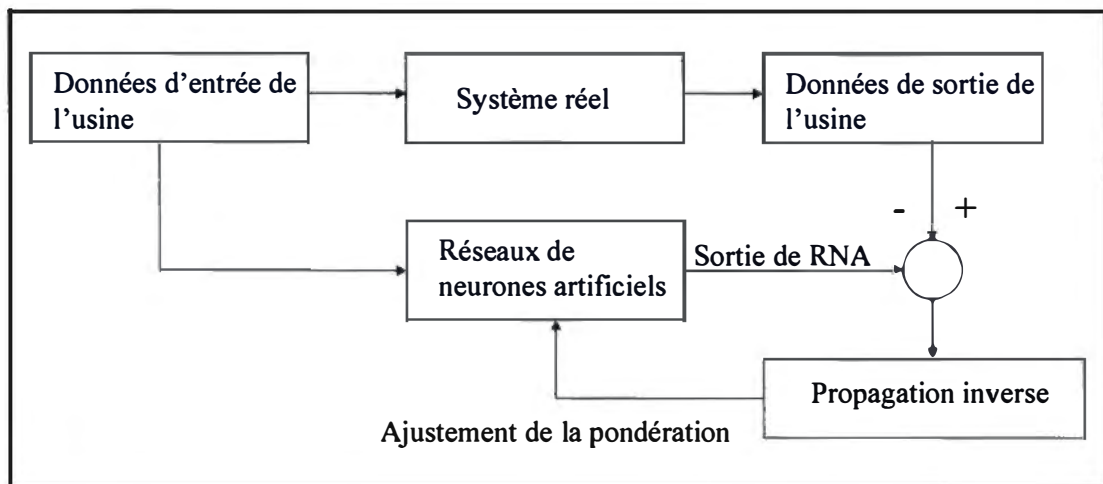


Figure 2.18 Apprentissage des réseaux de neurones

L'avantage du modèle de réseau de neurones est qu'il ne demande pas une formulation d'équations mathématiques exactes entre les données d'entrée et de sortie. Il peut résoudre des problèmes multivariables et non linéaires. Un premier désavantage de ce modèle est que si les variables sont en dehors de la limite des données utilisées pour l'entraînement du réseau, les résultats prédictifs seront imprécis à cause d'une saturation de la sortie. Un autre désavantage est que le modèle est implicite (boîte noire), on ne peut donc pas en tirer les dérivées souvent nécessaires par d'autres types d'algorithmes (par exemple en optimisation et contrôle).

Qian, Tessier et Dumont ont utilisé un modèle du réseau de neurones artificiel « feed-forward » dans le procédé de raffinage thermomécanique en 2 étages pour prédire les propriétés des pâtes [60].

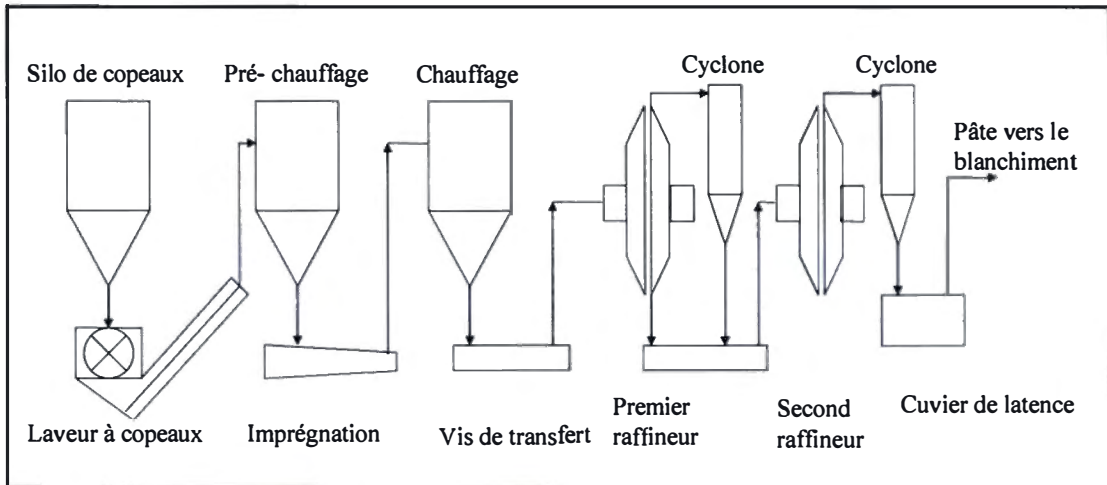


Figure 2.19 Schéma du procédé CTMP

À partir des données d'entrée (taux de production, énergie spécifique, consistance de raffinage) et de sortie (longueur de fibre, fraction de fibres longues, CSF, indice de déchirure), le réseau peut apprendre et capturer le modèle non linéaire entre ces variables.

La figure ci-dessous présente la structure du réseau utilisé.

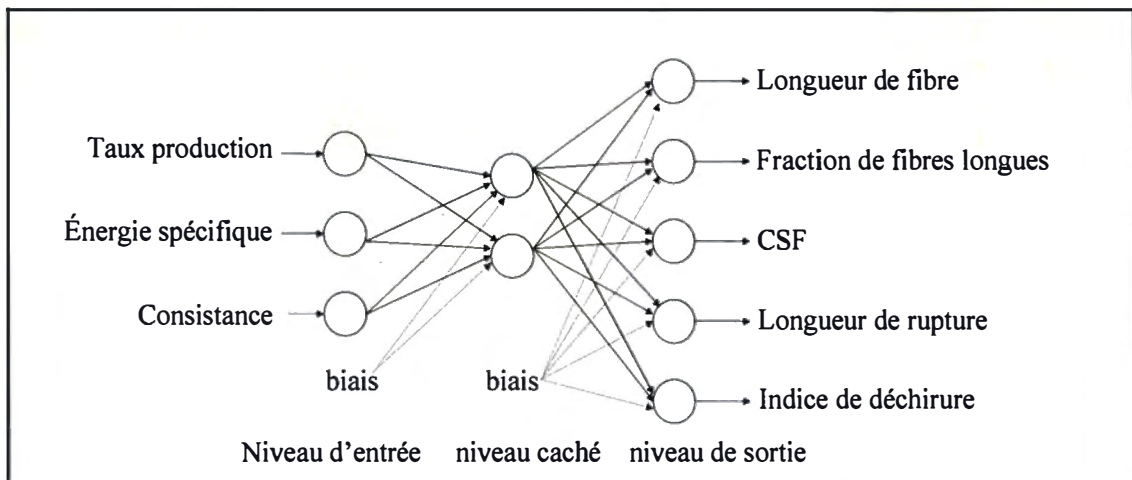


Figure 2.20 La structure des réseaux de neurones

Parmi 110 séries de données, 90 séries sont utilisées pour faire l'apprentissage du modèle et les 20 séries restantes pour valider le modèle (en général, on utilise environ 20% des données pour faire la validation du modèle). La structure du modèle est 3

neurones d'entrée, 2 neurones intermédiaires et 5 neurones de sorties. L'article montre que dans une large plage de valeurs, le modèle est relativement insensible au nombre de niveaux cachés et au nombre de neurones sur ces derniers. Pour le système non linéaire et statique testé, une structure de [3, 2, 5] ou [3, 3, 5] semblait suffisante. La moyenne de déviation des 5 sorties des réseaux est 7,9%.

Après avoir comparé les résultats prédictifs avec les valeurs de l'usine, ils ont trouvé que les erreurs entre les prédictions du modèle et les données de l'usine sont satisfaisantes.

La figure suivante présente la configuration des réseaux pour la simulation, le contrôle et l'optimisation du procédé.

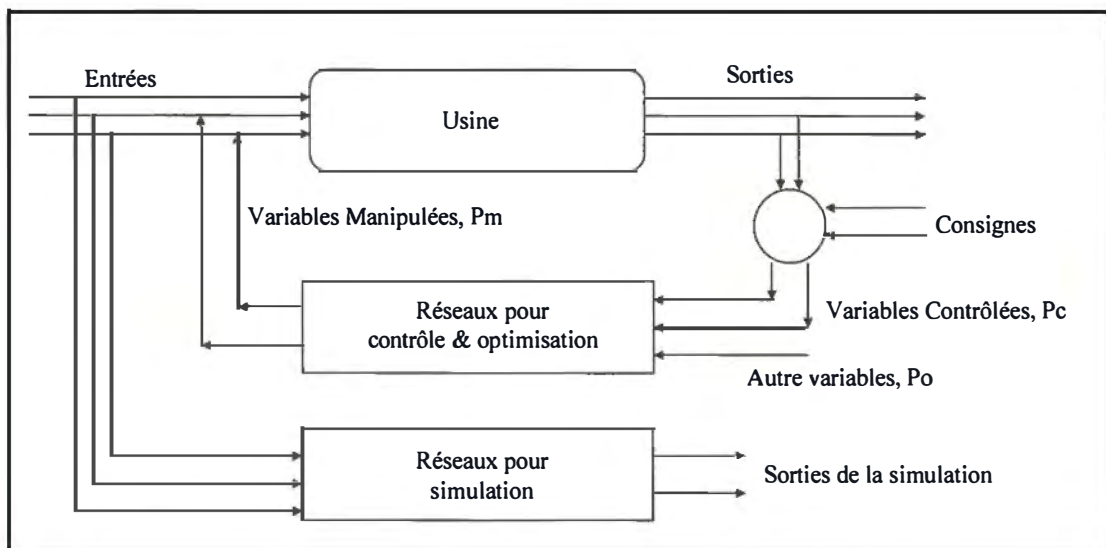


Figure 2.21 Les réseaux pour le contrôle, l'optimisation et la simulation du procédé

2.2 Les travaux relatifs aux propriétés des copeaux

Les variations des propriétés des copeaux peuvent affecter largement la qualité des pâtes et papiers. Ces dernières années, certains appareils avancés ont été développés pour mesurer et analyser les propriétés des copeaux, tels que : mesure de la dimension des copeaux [61], développement du capteur de mesure de la densité volumique des copeaux et de leur dimension [62]. Ces données sur les copeaux sont utilisés à des fins de contrôle et optimisation d'autres variables importantes du procédé, par exemple: mesures des caractéristiques du papier [63], consistance de raffinage [64] et influence

des copeaux sur la pâte [65], contrôle de l'alimentation des copeaux pour réduire la variance du produit [66] et mesure en ligne de la qualité des copeaux pour prédire la qualité de la pâte [67].

Dans l'article de Bergman, un système ScanChip est présenté. Il s'agit d'un analyseur optique en ligne qui donne une mesure de la qualité des copeaux basé sur leurs dimensions réelles [68]. Cet analyseur est relié à un ordinateur. On obtient les dimensions des copeaux en 3-dimensions (longueur, largeur et épaisseur). Les dimensions sont mesurées optiquement avec une caméra qui comprend un système d'éclairage. Tout cela peut être visualisé à l'écran, imprimé sous forme de rapports ou envoyé au système de contrôle existant de l'usine (figure 2.22).

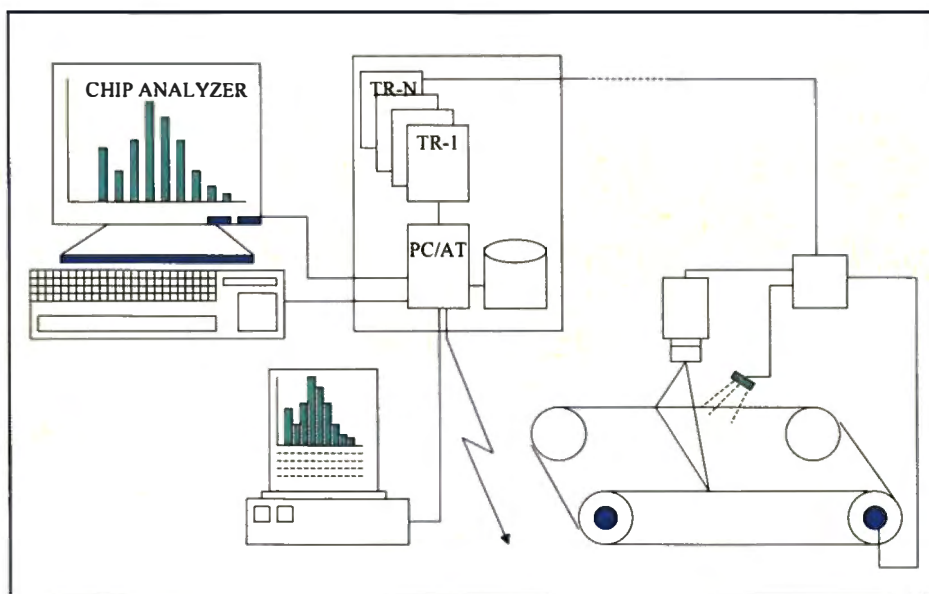


Figure 2.22 Schéma du système ScanChip

Le système ScanChip est déjà utilisé dans une usine suédoise de pâte à papier, où il est installé en aval du lessiveur continu. Cet emplacement permet au système d'émettre des alarmes au niveau de la qualité des copeaux ainsi qu'un contrôle automatisé des mélanges de différents stocks de copeaux. D'autres positionnements du système permettent de mesurer la qualité des copeaux à la sortie de la déchiqueteuse ou celle des copeaux en provenance de différents fournisseurs. Ce système procure instantanément des données sur la qualité des copeaux et achemine les résultats aux opérateurs ou au

système de contrôle du procédé. Il peut aider à définir et à contrôler la qualité des copeaux et les paramètres des procédés de fabrication de la pâte pour ainsi optimiser la production.

Ding, Bédard et Benaoudia présentent l'utilisation d'un autre système qui mesure des copeaux en ligne [69]. Le Chip Management System (CMS) est un système multi-senseur qui inclut des senseurs principaux et auxiliaires. Les senseurs principaux sont de type vision artificielle (caméra couleur RGB) et capteur d'infrarouge, pour mesurer respectivement la blancheur et le contenu en humidité des copeaux. Les senseurs auxiliaires comprennent un capteur de distance et un capteur de la condition de l'air. Leur but est d'augmenter les mesures des senseurs principaux en plus de stabiliser le système. Le CMS possède trois fonctions essentielles : (1) un moniteur de la qualité des copeaux, tels que l'humidité, la luminance, la densité; (2) un organisateur de piles de copeaux, construites pour l'atteinte d'une plage de blancheur spécifique ; (3) un moniteur du procédé, qui peut être utilisé en ligne pour vérifier la blancheur du bois. La figure 2.24 montre un système CMS avant l'entrée du système du raffinage.



Figure 2.23 Le système CMS

Avec le système CMS on peut obtenir les caractéristiques des copeaux en ligne. D'après cette information, les variables manipulées peuvent être ajustées dynamiquement pour améliorer les propriétés des pâtes.

Laperrière, Leduc, Daneault et Bédard ont utilisé le CMS pour prédire la blancheur des pâtes PTM blanchies au peroxyde d'hydrogène et fixer la dose de cet agent de blanchiment [70]. Les données de cette étude sont divisées en trois types : les propriétés des copeaux (obtenues du CMS), les paramètres opérationnels du raffineur et les caractéristiques de la qualité de pâte. Les données contiennent 178 variables distribuées en 460 essais pilotes.

Des échantillons ont été sélectionnés à 6 reprises durant une année complète suivant le plan expérimental décrit au tableau 2-1 pour évaluer l'effet du vieillissement des copeaux en pile en plus de l'impact des essences.

**Tableau 2-1 Plan expérimental pour le mélange
des 4 essences différentes**

Essais	EP	SAP	PG	BOU
Essais principaux				
1	0	0,2	0,4	0,4
2	1	0	0	0
3	0	1	0	0
4	0,6	0	0	0,4
5	0	0,6	0,4	0
6	0,6	0	0,4	0
7	0	0,6	0	0,4
8	0,2	0	0,4	0,4
Essais répétés pour déterminer l'erreur expérimentale				
9	1	0	0	0
10	0	1	0	0
Essais additionnels				
11	0	0	1	0
12	0	0	0	1

La figure 2.24 montre les valeurs observées et prédites pour la blancheur ISO. Le tableau 2-1 montre l'influence de la qualité des copeaux sur les charges de peroxydes pour arriver à des consignes de blancheur différentes.

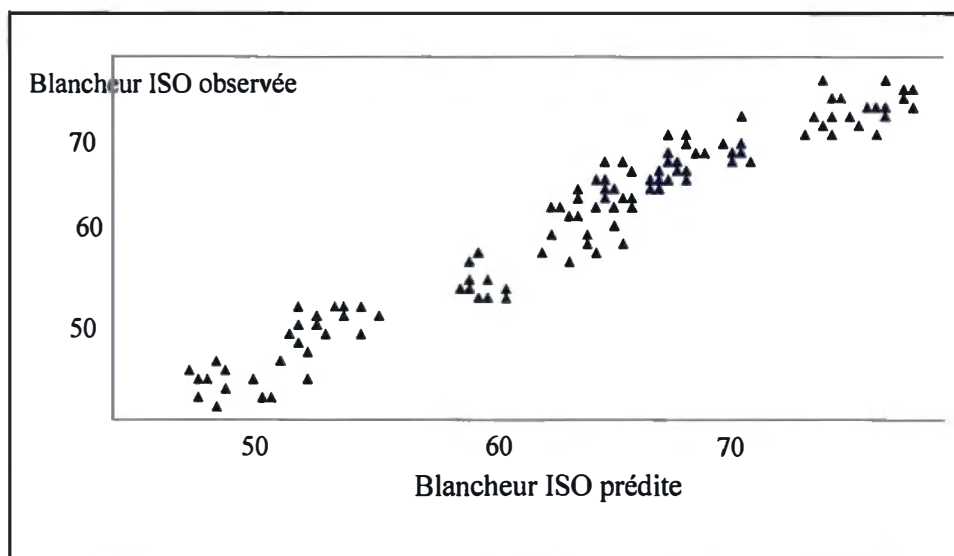


Figure 2.24 Les valeurs observées et prédites de la blancheur ISO

Ces données expérimentales ont été utilisées pour entraîner un réseau de neurones qui peut simuler le procédé de raffinage et prédire les propriétés des pâtes. Le tableau 2-2 montre les résultats simulés.

Tableau 2-2 Effet de la qualité des copeaux sur les charges peroxydes nécessaires à l'obtention d'une blancheur de pâte

Consigne blancheur (%)	Charge peroxyde (%) copeaux moyens	Charge peroxyde (%) meilleurs copeaux théoriques	Charge peroxyde (%) meilleurs copeaux expérimentaux
55	0,77	0,0	0,15
60	1,41	0,0	0,76
65	2,22	0,35	1,48
70	4,12	1,21	2,92
71	4,99	1,48	3,54
75	Non faisable (max 71,0%)	4,96	Non faisable (max 72,5%)

2.3 Contrôle du procédé TMP

Le but général du contrôle est la minimisation de l'erreur entre la consigne et la mesure [71, 72, 73]. Parmi les variables manipulées typiquement rencontrées, on note celles qui

sont reliées à la matière première (essences du bois, dimensions des copeaux) [74] et celles qui sont reliées aux paramètres du procédé TMP (charge du moteur, vitesse de la vis d'alimentation, taux de dilution et/ou consistance, pression [75], vitesse de rotation des plaques [76], etc.). Dans les sections suivantes, nous présentons les principales stratégies de contrôle du procédé de raffinage thermomécanique.

2.3.1 Le contrôleur PID

Le PID est la méthode de contrôle la plus largement utilisée dans les usines, il inclut trois parties : le contrôle proportionnel (P), l'action intégrale (I) et l'action dérivative (D). Le contrôle proportionnel peut être présenté par équation 2.43, $u(t)$ est relié à $e(t)$ par un gain de proportion K_c :

$$u(t) = K_c e(t) \quad \text{Équation 2.40}$$

où :

$u(t)$: *variable manipulée* ;

K_c : *gain proportionnel* ;

$e(t)$: *signal d'erreur*

On peut donc changer la valeur de K_c ou de $u(t)$ pour minimiser l'erreur $e(t)$.

Quoique le contrôle proportionnel puisse diminuer l'erreur, en général il ne l'élimine jamais complètement. Pour résoudre ce problème, en pratique, on peut ajouter une action intégrale dans le contrôle proportionnel:

$$u(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt \quad \text{Équation 2.41}$$

où :

τ_I : *constante du temps, typiquement 0.1 à 50 minutes pour les procédés papetiers*

On ajoute parfois un troisième terme dérivatif qui apporte une certaine capacité de prédiction, mais un signal de perturbation peut affecter largement l'action dérivative. On utilise en général le contrôleur PI seulement (τ_D est le taux dérivatif).

$$u(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Équation 2.42}$$

Dans le contrôleur PID, K_c , τ_I , τ_D sont des paramètres à spécifier. Le choix est délicat car de mauvaises valeurs peuvent engendrer un état instable (oscillation autour de la consigne). La figure suivante montre la structure d'un système de rétroaction avec un contrôleur PID.

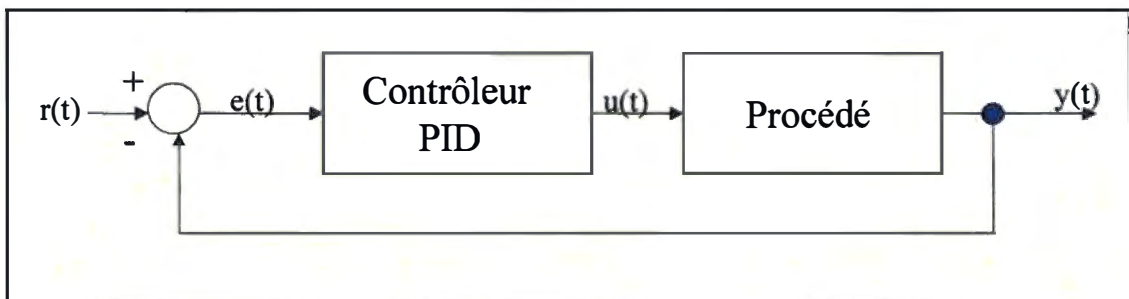


Figure 2.25 Utilisation de PID dans une boucle de contrôle avec rétroaction

Après avoir comparé la consigne $r(t)$ et la variable mesurée $y(t)$, l'erreur $e(t)$ est envoyée au contrôleur PID et la variable manipulée $u(t)$ est calculée. La boucle se répète jusqu'à ce que l'erreur soit diminuée à une valeur désirée (en général zéro).

Gresham a utilisé un contrôleur PI dans une boucle du procédé de raffinage thermomécanique pour contrôler la charge du moteur (figure 2.26) [77]. La variation de la charge du moteur affecte largement les propriétés des pâtes PTM. Un contrôleur PI est utilisé pour contrôler la charge du moteur à partir de la variation dans les caractéristiques des copeaux, la vitesse d'alimentation des copeaux, la consistance dans la zone du raffinage et l'entrefer du raffineur. Le système étudié possède 2 stades. Les entrefers des plaques sont contrôlés par un cylindre hydraulique. La consistance dans la zone raffinée est ajustée par l'eau de dilution. On utilise deux transmetteurs de voltage linéaire différentiel (LVDT) pour mesurer l'entrefer des plaques. Un LVDT mesure le

mouvement des disques, l'autre mesure la tension physique. Les deux signaux offrent une estimation de la position vraie des plaques. L'entrefer est ajusté manuellement pour maintenir la charge du moteur. Le taux de production et l'énergie spécifique sont contrôlés par la vitesse de rotation de la vis d'alimentation du raffineur. La figure suivante présente le système de contrôle.

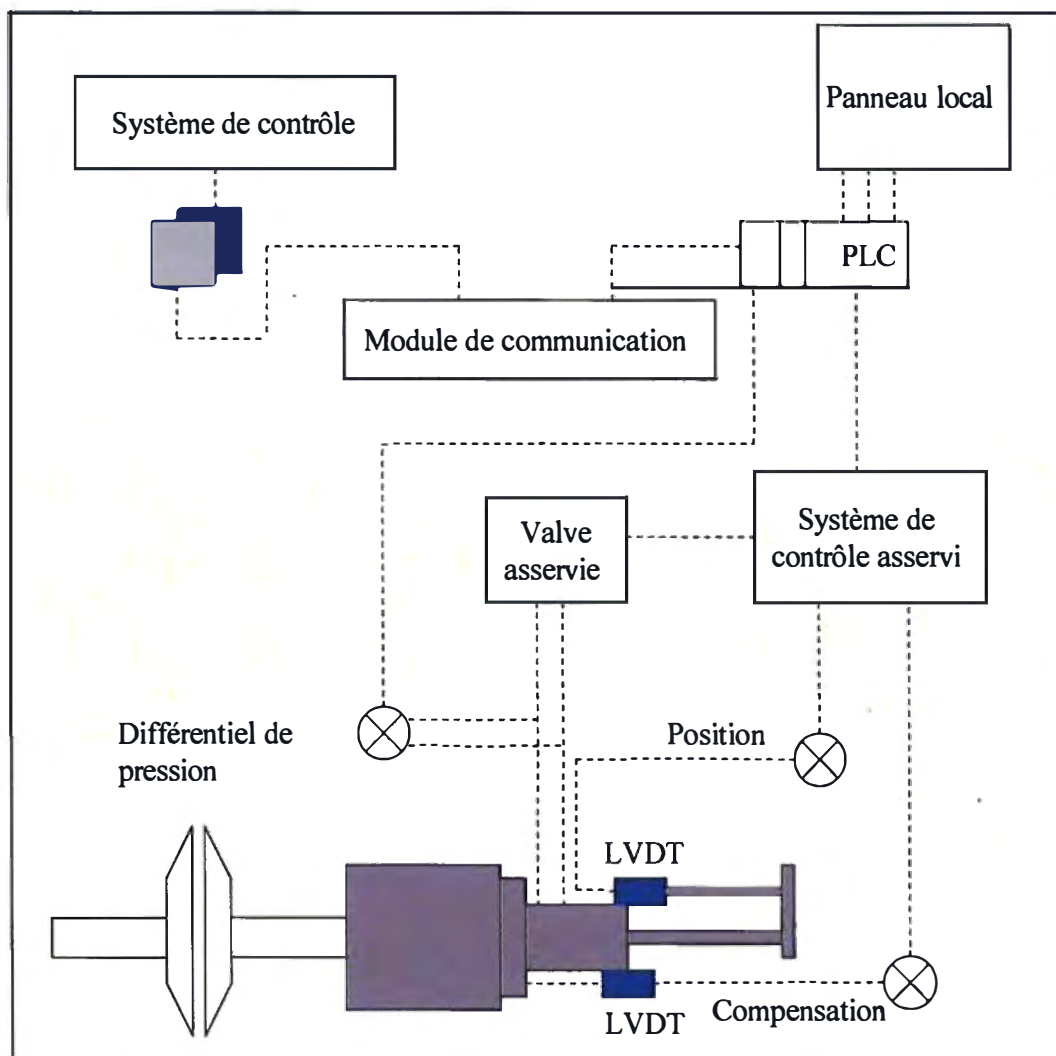


Figure 2.26 Système de contrôle PI

Les résultats montrent une diminution significative de la charge du moteur et de la déviation standard du CSF résultant.

Bien que le contrôleur PI puisse contrôler dynamiquement un procédé, il lui manque une certaine capacité de prédiction. Un contrôleur PI exclut aussi également les cas non

linéaires et multivariables. Il devient aussi très limité si la réponse possède un délai ou temps mort. Dans de tels cas on peut toujours utiliser le prédicteur de Smith [78]. En résumé, le prédicteur de Smith utilise une boucle intérieure, laquelle inclut un modèle de simulation du procédé sans le temps mort, installé en parallèle au contrôleur de procédé. Si ce modèle de simulation peut prédire assez exactement le résultat, et s'il n'a pas de décalage, alors la sortie de ce modèle devance le procédé réel, et dans ce cas on peut donc dire qu'il possède une capacité de prédiction.

2.3.2 Le contrôleur par anticipation

La présence d'un temps mort limite la capacité de contrôle d'un PID. On peut alors améliorer le procédé par un contrôle par anticipation (CA).

Le CA requiert une compréhension de la relation mathématique entre les variables manipulées et les variables contrôlées. Il requiert aussi une mesure des variables de perturbation et autres variables de procédé qui sont nécessaires pour calculer correctement la valeur manipulée pour la condition d'opération courante. Les calculs utilisés dans la plupart des CA sont basés sur un bilan du procédé en régime permanent (massique ou énergétique). Puisque le CA utilise un modèle mathématique entre les variables mises en jeu dans l'objectif de contrôle, ce système possède donc une certaine capacité de prédiction (en fait, d'anticipation). La figure 2.27 montre l'utilisation du CA en parallèle avec un contrôleur PID. L'ajout de cette boucle possède plusieurs avantages, comme un temps de réaction réduit et des réponses plus stables (figure 2.28).

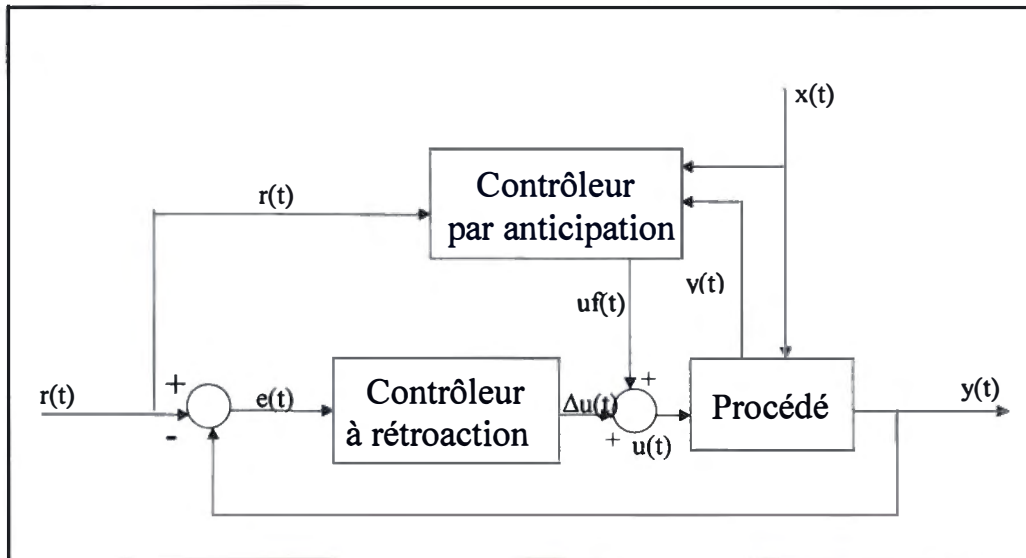


Figure 2.27 Système de contrôle par anticipation

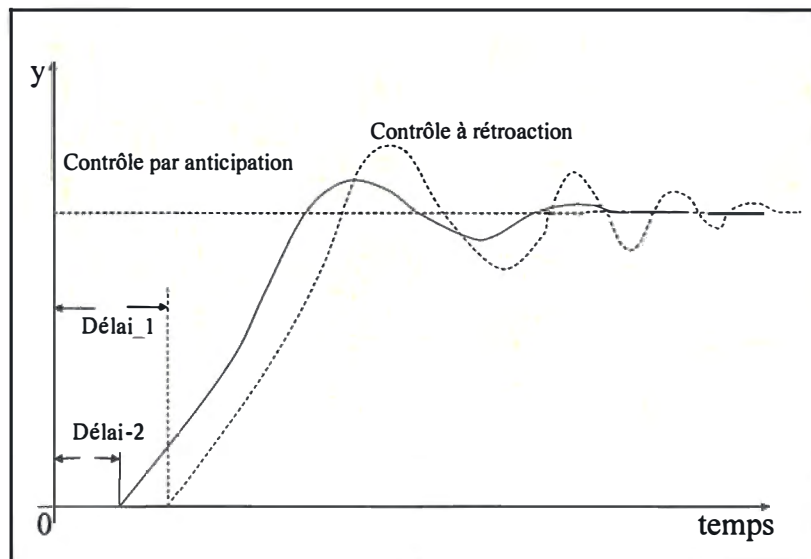


Figure 2.28 Réponse du CA vs le contrôle PID

Raimo, Kari et Kauro ont utilisé un CA dans un procédé de raffinage thermomécanique [79], pour lequel il existe des dépendances non linéaires entre la qualité des pâtes et les variables manipulées du procédé. Ils ont développé un équipement pour mesurer la consistance de la pâte à la sortie du raffineur. Basé sur cette information et autres variables typiques, ce système peut prédire la consistance de raffinage et le débit de copeaux requis.

La figure suivante montre la structure d'un CMI [80]. On voit que la différence entre le CMI et le système de rétroaction conventionnel est l'addition d'un modèle G_m qui est parallèle au procédé G_p . La sortie du modèle $\hat{y}(s)$ est la sortie prédictive du procédé. Si la variable manipulée u est changée et que le modèle est parfait, les deux sorties y' et $\hat{y}(s)$ changeront de la même façon. $d(s)$ est une perturbation inconnue, laquelle peut affecter le système, donnée par :

$$\hat{d}(s) = [G_p(s) - G_m(s)] * u(s) + d(s) \quad \text{Équation 2.43}$$

Si $d(s)$ est zéro, alors $\hat{d}(s)$ est une mesure de la différence entre le procédé $G_p(s)$ et le modèle $G_m(s)$. Si $G_p(s) = G_m(s)$, dans ce cas $\hat{d}(s)$ égale la perturbation inconnue. Donc $\hat{d}(s)$ peut être regardé comme l'information non modélisée dans le modèle $G_m(s)$ et peut être utilisé pour améliorer le contrôle. En soustrayant cette différence $\hat{d}(s)$ de la consigne, la variable d'entrée du contrôleur G_{IMC} est une erreur beaucoup plus représentative. Le système CMI est donc un système de rétroaction spécial qui estime la composante de perturbation $d(s)$ dans le signal d'erreur.

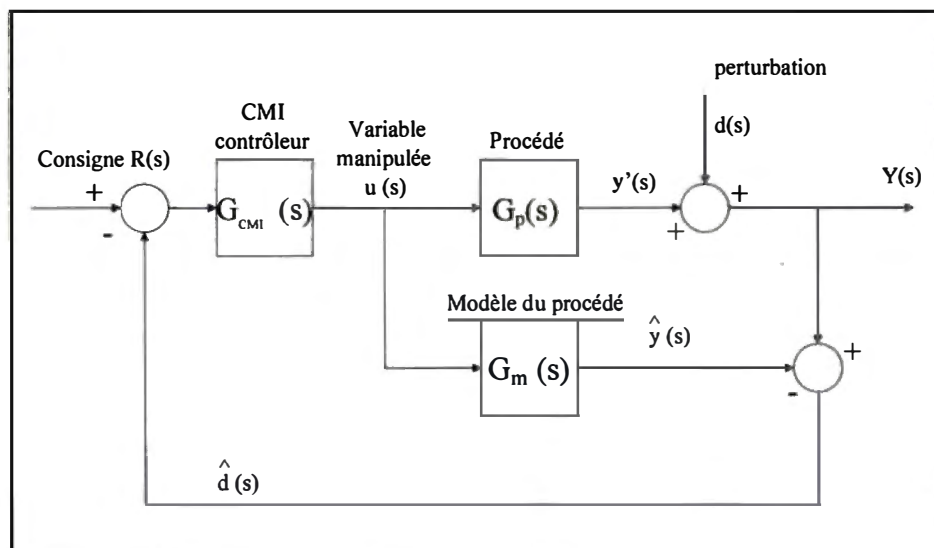


Figure 2.30 Structure du contrôleur CMI

La fonction de transfert de la boucle fermée pour le CMI est donc :

$$Y(s) = \frac{[R(s) - d(s)]G_{CMI}(s)G_p(s)}{1 + [G_p(s) - G_m(s)]G_{CMI}(s)} + d(s) \quad \text{Équation 2.44}$$

En théorie, si $G_{CMI}(s) = G_p(s)^{-1}$, et si $G_p(s) = G_m(s)$, alors la consigne serait parfaitement suivie et la perturbation serait complètement rejetée.

2.3.4 Le contrôle par modèle prédictif (CMP)

Contrairement aux contrôleurs décrits plus haut où les erreurs sont calculées entre les consignes et les valeurs mesurées à chaque instant, pour un CMP, les erreurs sont entre une *trajectoire* future des consignes et une *trajectoire* de prédiction des variables mesurées selon un modèle qui les prédit. La figure 2.31 présente la structure générale d'un CMP. On remarque que la sortie du contrôleur est un vecteur de valeurs futures de la variable manipulée $u(t+m)$ où m est l'horizon de contrôle. On remarque aussi que le modèle estime une trajectoire prédictive (donc un vecteur) de la variable mesurée $y(t+p)$ où p est l'horizon de prédiction. À chaque itération ces trajectoires sont recalculées par minimisation de la trajectoire d'erreur, définie comme la différence entre la trajectoire de consigne $r(t)$ et la trajectoire prédictive $y(t+p)$ (figure 2.32). Le vecteur d'erreur est minimisée par une phase d'optimisation qui renvoie le vecteur de variables manipulées $u(t)$ optimales. On peut donc dire que MPC est une extension vectorielle de MCI [37] et que ce contrôleur extrapole les corrections à effectuer dans un horizon futur de temps.

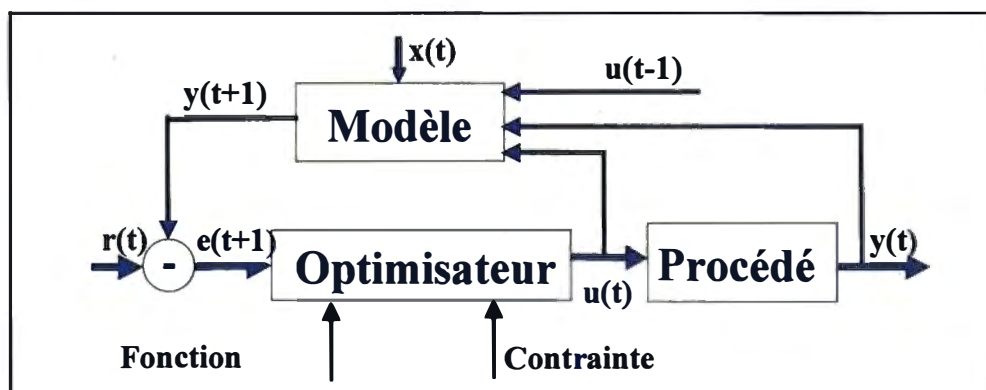


Figure 2.31 Structure d'un CMP

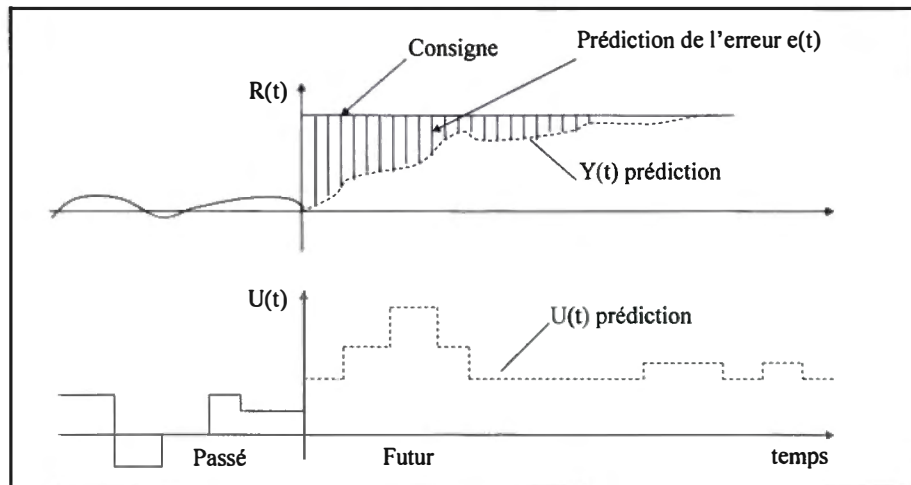


Figure 2.32 Illustration graphique de l'opération d'un contrôle CMP

Un système CMP a été utilisé dans un procédé de raffinage thermomécanique (figure 2.33) [81] pour stabiliser et optimiser le procédé de raffinage. La stabilisation est réalisée par un modèle multivariables par le biais d'un CMP. L'optimisation est basée sur l'information de la qualité de pâte (CSF et longueur des fibres), laquelle est mesurée en ligne par un capteur.

Une matrice est utilisée dans le modèle d'optimisation pour présenter la relation entre la qualité de la pâte et les variables de contrôle (gain de rétroaction) et manipulées du procédé.

Les résultats montrent que ce modèle réduit de 40% la variation du CSF et de 21% la longueur moyenne des fibres.

Le problème de ce système est qu'il lui manque la capacité de mesurer en ligne l'information sur les caractéristiques des copeaux qui peuvent affecter largement les propriétés des pâtes.

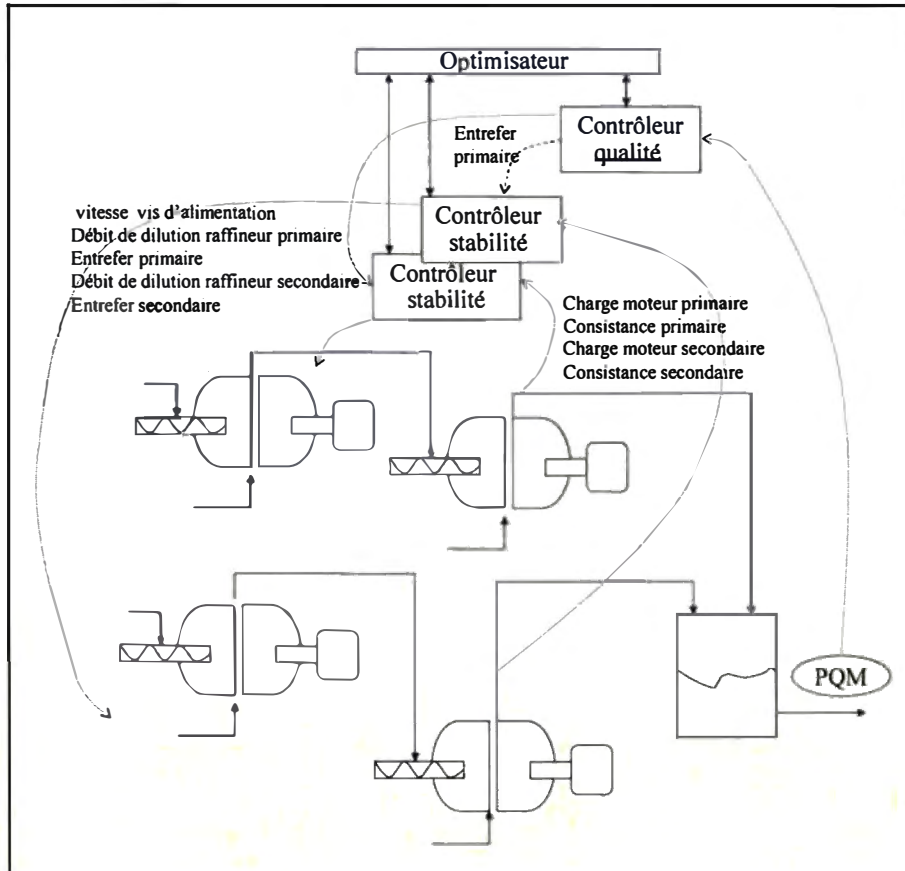


Figure 2.33 Schéma d'une stratégie de contrôle à deux niveaux

2.4 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de cette recherche est de réduire la variabilité de la qualité des pâtes PTM produites. Dans ce chapitre on a vu que cet objectif est principalement influencé par deux sources: le type de contrôle utilisé, en particulier si ce dernier comporte un modèle ou non, et la possibilité de mesurer ou non les perturbations causées par les fluctuations dans les propriétés de matière première (i.e. les copeaux). Dans cette recherche on désire capitaliser tant sur la conception de contrôleurs plus avancés que sur la possibilité de mesurer l'effet des perturbations sur les propriétés de copeaux.

Les étapes suivantes décrivent en même temps les objectifs secondaires visés par cette recherche:

- 1- Faire une analyse multivariées de la base de données CRIQ-UQTR pour déterminer quelles variables sont les plus influentes et établir les relations entre elles¹ (chapitre 3);
- 2- Comparer l'influence des variables reliées aux copeaux à celles reliées aux paramètres du procédé dans les modèles de calcul des propriétés de pâtes produites (chapitre 3);
- 3- Bâtir un modèle de calcul des propriétés des pâtes qui réagit aux conditions du procédé et aux fluctuations des propriétés de copeaux tels que mesurés par l'appareil CMS (chapitre 4);
- 4- Développer un simulateur dont les modèles reproduisent les données de la base de données CRIQ-UQTR et les conditions d'opération de l'usine pilote (chapitres 4 et 5);
- 5- Implanter et valider des stratégies de contrôle du procédé à partir des modèles développés, à savoir: action sur le procédé, action sur les copeaux, ou les deux (chapitres 6 et 7);
- 6- Démontrer les avantages de la nouvelle stratégie de contrôle proposée, en particulier sur l'objectif principal de diminution de la variabilité, et possiblement sur la diminution de l'énergie, sur l'augmentation de la production, ou autres (chapitre 8).

¹ Dans cette recherche on dispose d'une base de données qui résulte de centaines d'essais en usine pilote pour caractériser l'effet des paramètres de copeaux et de procédé sur la qualité des pâtes PTM résultantes.

Chapitre 3 Analyse multivariables

Dans le procédé PTM, les caractéristiques des copeaux et les variables manipulées du procédé affectent largement les propriétés des pâtes et papiers. Les relations entre ces trois catégories de variables sont complexes et parfois elles ne peuvent pas être décrites précisément. Dans cette recherche, plusieurs variables dans les trois catégories ont été analysées avec les PLS. Comme vu au chapitre 2, d'autres chercheurs ont aussi démontré que les caractéristiques des copeaux peuvent influencer significativement les propriétés des pâtes, et que les variables manipulées du procédé des deux stades de raffinage possèdent des influences différentes sur les propriétés des pâtes.

3.1 Plan expérimental

Quatre essences de bois (épinette, sapin, pin gris et bouleau) mélangées en pourcentage de poids différents ont été raffinées en 2 stades de raffinage. Les données expérimentales résultantes sont rapportées dans une base de données Excel qui comprend 36 colonnes (les variables copeaux, procédé et pâte) et 460 lignes (le nombre d'essais). Le tableau 3-1 présente un exemple des combinaisons de mélanges. Toutes les données expérimentales sont ensuite analysées par la méthode PLS [82, 83].

Les essais ont été exécutés sur le raffineur pilote Metso CD-300 du Centre Intégré en Pâtes et Papiers. Chaque échantillon de copeaux a été trié par un classeur RADER dont seuls les copeaux d'épaisseur de 1 à 6 mm se sont qualifiés. Ensuite, les copeaux ont été mélangés suivant des proportions différentes selon le poids. Chaque échantillon a ensuite été passé dans l'appareil Chip Management System (CMS) pour obtenir des caractéristiques telles que la luminance et l'humidité. Les copeaux ont ensuite été lavés pour éliminer les saletés et ils ont finalement été raffinés dans les deux stades de l'unité pilote.

La température au premier stade était de 124 à 140°C. Le deuxième stade s'est effectué à pression atmosphérique. L'entrefer du second stade était modulé pour obtenir quatre niveaux d'énergie et d'indice d'égouttage. Les propriétés des pâtes produites (CSF,

longueur de fibre, rupture, coefficient de diffusion) ont ensuite été mesurées en laboratoire par les méthodes standardisées de l'ATPPC. La géométrie des plaques et la vitesse de rotation sont demeurés constantes. L'intensité de raffinage a tout de même varié car les divers niveaux de dilution ont influencé la consistance.

Tableau 3-1 Proportion des mélanges dans le plan expérimental

Essais	EP	SAP	PG	BOU
Essais principaux				
1	0	0,2	0,4	0,4
2	1	0	0	0
3	0	1	0	0
4	0,6	0	0	0,4
5	0	0,6	0,4	0
6	0,6	0	0,4	0
7	0	0,6	0	0,4
8	0,2	0	0,4	0,4
Essais répétés pour déterminer l'erreur expérimentale				
9	1	0	0	0
10	0	1	0	0
Essais additionnels				
11	0	0	1	0
12	0	0	0	1

Les tableaux 3-2 et 3-3 montrent une partie des résultats expérimentaux incluant les trois types de variables: copeaux, procédé et produit. Les données expérimentales sont obtenues en groupes d'essais, chaque groupe d'essai (IDbatch dans les tableaux) possède quatre lignes, dans lesquelles les pourcentages des quatre sortes des copeaux, les caractéristiques des copeaux, les paramètres de procédé du premier stade et deux des paramètres de procédé du second stade (Dil_2 et Vit_2) sont fixés. Seule une partie des paramètres de procédé du second stade sont changés à chaque groupe d'essais, en particulier Ent_2 et Charge_2, pour obtenir quatre niveaux d'énergie spécifique dans chaque groupe. Bien sûr, les propriétés finales des pâtes et papiers mesurées sont alors différentes dans un même groupe d'essais.

Tableau 3-2 Extrait des données expérimentales : propriétés de copeaux et paramètres du raffineur

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	IDBatch	CopeauxID	Lumin	H	S	L	Humid	Dens	Lumin	Charge_1	Ent_1	Temp_1	Dil_1	Charge_2	Ent_2	Dil_2	vit_2
2	2	A01	52,0	22,1	108,7	51,9	48,85	0,447	52,0	31,4	0,55	140	0,3	40	0,5	1516	3565
3	2	A01	52,0	22,1	108,7	51,9	48,85	0,447	52,0	31,4	0,55	140	0,3	48	0,45	1516	3565
4	2	A01	52,0	22,1	108,7	51,9	48,85	0,447	52,0	31,4	0,55	140	0,3	50	0,42	1516	3565
5	2	A01	52,0	22,1	108,7	51,9	48,85	0,447	52,0	31,4	0,55	140	0,3	52	0,4	1516	3565
6	3	A11	57,9	21,4	105,8	58,5	48,93	0,442	57,9	29,4	0,6	140	0,3	32	0,5	1819	3565
7	3	A11	57,9	21,4	105,8	58,5	48,93	0,442	57,9	29,4	0,6	140	0,3	38	0,48	1819	3565
8	3	A11	57,9	21,4	105,8	58,5	48,93	0,442	57,9	29,4	0,6	140	0,3	42	0,45	1819	3565
9	3	A11	57,9	21,4	105,8	58,5	48,93	0,442	57,9	29,4	0,6	140	0,3	48	0,42	1819	3565
10	4	A12	47,5	22,4	125,7	43,5	53,35	0,509	47,5	36,5	0,5	140	0,38	50	0,38	1971	3565
11	4	A12	47,5	22,4	125,7	43,5	53,35	0,509	47,5	36,5	0,5	140	0,38	54	0,35	1971	3565
12	4	A12	47,5	22,4	125,7	43,5	53,35	0,509	47,5	36,5	0,5	140	0,38	54	0,32	1971	3565
13	4	A12	47,5	22,4	125,7	43,5	53,35	0,509	47,5	36,5	0,5	140	0,38	64	0,3	1971	3565
14	5	A02	51,3	21,7	103,4	51,3	49,23	0,383	51,3	25,3	0,8	140	0,25	38	0,48	1668	3565
15	5	A02	51,3	21,7	103,4	51,3	49,23	0,383	51,3	25,3	0,8	140	0,25	44	0,42	1668	3565
16	5	A02	51,3	21,7	103,4	51,3	49,23	0,383	51,3	25,3	0,8	140	0,25	46	0,4	1668	3565
17	5	A02	51,3	21,7	103,4	51,3	49,23	0,383	51,3	25,3	0,8	140	0,25	56	0,38	1668	3565
18	6	A03	56,5	22,2	98,9	56,5	48,62	0,334	56,5	26,4	0,8	140	0,35	24	0,8	1516	3565
19	6	A03	56,5	22,2	98,9	56,5	48,62	0,334	56,5	26,4	0,8	140	0,35	32	0,675	1516	3565
20	6	A03	56,5	22,2	98,9	56,5	48,62	0,334	56,5	26,4	0,8	140	0,35	36	0,613	1516	3565

Tableau 3-3 Extrait des données expérimentales : essences et qualité des pâtes

			16	17	18	19		20	21	22	23	24	25	26	27	28
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	IDBatch	CopeauxID	EP	SAP	PG	BOU	Humid	Cons_1	Prod_1	Cons_2	Prod_2	CSF_1	CSF_2	LF_2	Rupture	C_Diff_2
2	2	A01	0	20	40	40	48,85	24,64	0,548	11,64	0,597	413,00	209,00	1,30	19,97	52,33
3	2	A01	0	20	40	40	48,85	24,64	0,548	13	0,551	413,00	157,00	1,23	21,62	55,79
4	2	A01	0	20	40	40	48,85	24,64	0,548	12,64	0,496	413,00	122,00	1,22	26,56	58,22
5	2	A01	0	20	40	40	48,85	24,64	0,548	12,7	0,429	413,00	112,00	1,19	26,71	58,64
6	3	A11	0	0	100	0	48,93	29,12	0,632	11,62	0,533	606,00	261,00	1,76	23,65	43,07
7	3	A11	0	0	100	0	48,93	29,12	0,632	10,44	0,422	606,00	210,00	1,69	25,43	46,72
8	3	A11	0	0	100	0	48,93	29,12	0,632	12,74	0,563	606,00	197,00	1,66	26,90	48,60
9	3	A11	0	0	100	0	48,93	29,12	0,632	12,8	0,439	606,00	150,00	1,63	30,47	51,70
10	4	A12	0	0	0	100	53,35	27,62	0,635	14,12	0,611	447,75	262,00	0,84	10,62	51,77
11	4	A12	0	0	0	100	53,35	27,62	0,635	14,66	0,656	447,75	249,00	0,81	11,81	51,91
12	4	A12	0	0	0	100	53,35	27,62	0,635	13,54	0,606	447,75	205,00	0,77	11,59	53,78
13	4	A12	0	0	0	100	53,35	27,62	0,635	15,62	0,680	447,75	116,00	0,62	11,06	58,72
14	5	A02	100	0	0	0	49,23	22,09	0,391	11,42	0,456	562,75	209,00	2,00	43,86	48,23
15	5	A02	100	0	0	0	49,23	22,09	0,391	12,08	0,463	562,75	202,00	1,93	41,63	50,02
16	5	A02	100	0	0	0	49,23	22,09	0,391	12,08	0,393	562,75	167,00	1,91	47,09	50,27
17	5	A02	100	0	0	0	49,23	22,09	0,391	13	0,421	562,75	128,00	1,83	49,03	52,61
18	6	A03	0	100	0	0	48,62	20,58	0,507	9,72	0,472	465,50	247,00	1,63	36,17	55,57
19	6	A03	0	100	0	0	48,62	20,58	0,507	10,26	0,486	465,50	217,50	1,63	39,94	57,20
20	6	A03	0	100	0	0	48,62	20,58	0,507	10,44	0,498	465,50	202,50	1,63	43,27	58,35

où:

Lumin : luminance des copeaux;

H(hue, teinte), S(saturation), L(luminosité) : paramètres de teinte des copeaux mesurés par CMS ;

Humid : humidité de surface des copeaux;

Dens : densité des copeaux ;

Consis_1 : consistance du stade_1 ;

Prod_1 : taux de production du stade_1 ;

Consis_2 : consistance du stade_2 ;

Prod_2 : taux de production du stade_2 ;

Charge_1 : charge de moteur du stade_1 ;

Ent_1 : entrefer de plaque du stade_1 ;

Dil_1 : dilution du stade_1 ;

Temp_1 : température du stade_1 ;

Charge_2 : charge de moteur du stade_2 ;

Ent_2 : entrefer de plaque du stade_2 ;

Dil_2 : dilution du stade_2 ;

Vit_2 : vitesse de rotation du stade_2 ;

CSF_1 : indice d'égouttage du stade_1 ;

CSF_2 : indice d'égouttage du stade_2 ;

LF_2 : longueur de fibre du stade_2 ;

Rupture_2 : indice de rupture;

C_Diff_2 : coefficient de diffusion de la lumière.

3.2 Relation entre les caractéristiques des copeaux et les propriétés des pâtes et papiers

Les figures de 3.1 à 3.3 montrent les résultats par analyse PCA pour dix variables des copeaux (quatre pourcentages d'essences : épinette %, pin gris %, sapin %, bouleau %; et six caractéristiques des copeaux : luminance, H, S, L, humidité, densité) et leur influence sur quatre propriétés de pâte (CSF_2, LF_2, Rupture_2 et C_Diff_2).

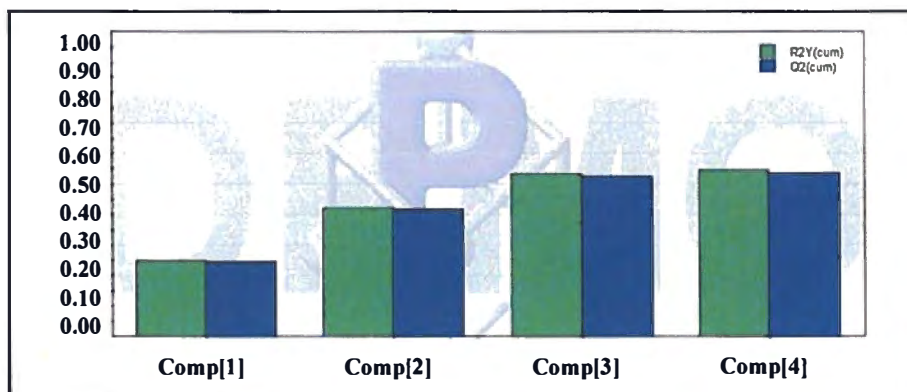


Figure 3.1 Quatre composantes principales obtenues pour les dix variables des copeaux

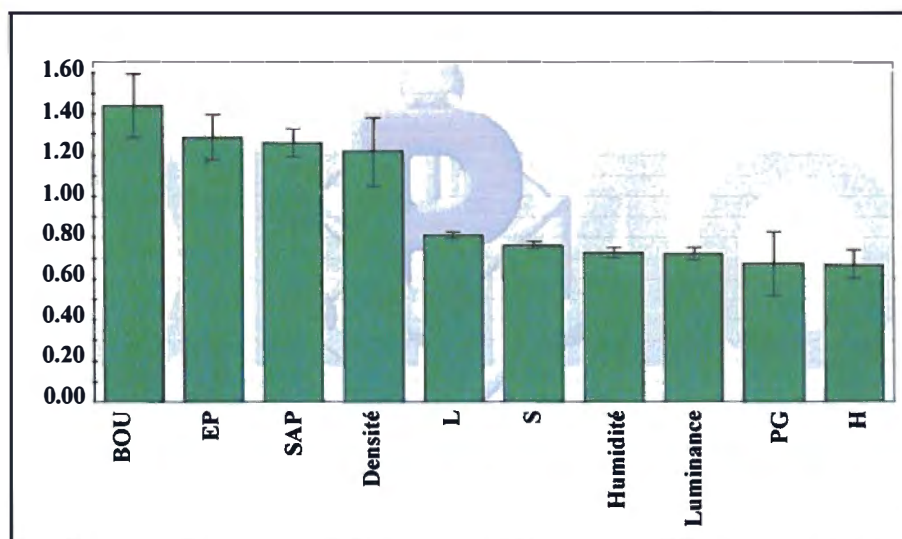


Figure 3.2 Importance relative des dix variables des copeaux qui contribuent aux quatre composantes principales

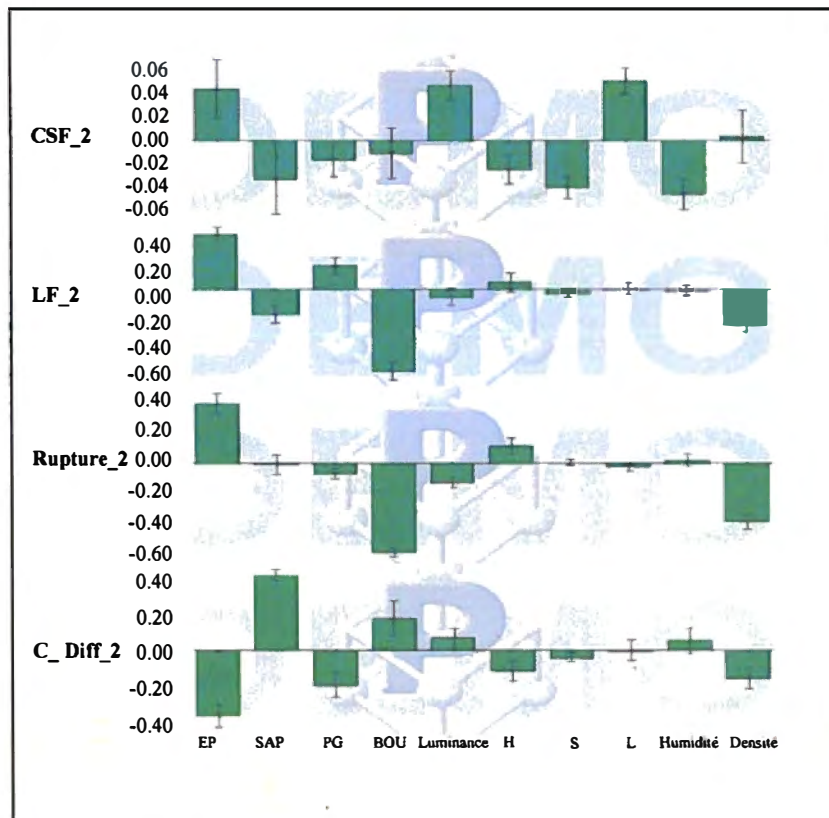


Figure 3.3 Relations entre les variables des copeaux et les propriétés de pâtes et papiers

La figure 3.1 illustre que quatre composantes principales pour les copeaux sont requises dans le modèle pour obtenir près de 55% de la capacité prédictive de la variation dans les propriétés des pâtes et papiers. On conclut que les caractéristiques des copeaux ont clairement une influence significative sur la qualité des pâtes.

On remarque aussi que parmi les dix variables de copeaux sélectionnées, les essences de bois épinette, sapin, bouleau et la densité sont les plus importantes (figure 3.2). On suppose donc que durant la fibrillation, les conditions de raffinage étaient telles que la surface des fibres de PG ont subi un moins bon développement que les autres essences, expliquant leur plus faible influence.

3.2.1 Explication des effets des paramètres de copeaux sur les propriétés des pâtes et papiers obtenues

De façon plus détaillée, en se référant à la figure 3.3, on remarque que le bouleau n'affecte pas significativement le CSF_2 parce que les fibres de BOU sont très courtes (1.2mm) et très dures, et donc la surface des fibres n'est pas suffisamment développée. La densité a également peu d'influence car le CSF_2 est affecté directement par le développement des surfaces des fibres, peu importe leur densité.

Le BOU et l'EP influencent largement LF_2. Les longueurs des fibres de l'EP et du BOU sont respectivement les plus longues (EP > 2.2mm) et les plus courtes (BOU < 1.2mm) et elles affectent donc largement la moyenne de la longueur des fibres. De plus, puisque les essences différentes ont des densités différentes, on remarque aussi une influence de la densité sur LF_2.

L'EP, le BOU et la densité agissent sur Rupture_2. La relation entre la Rupture_2 et la longueur de fibre est bien connue. Pour ce qui est des deux autres essences, avec la même énergie, le sapin et le pin gris sont plus développés au stade 2 mais ils présentent en même temps plus de fibres coupées. Ces deux facteurs (longueur de fibre et développement de la fibre) semblent limiter leur effet sur Rupture_2.

En général, le coefficient de diffusion du papier dépend de 3 facteurs: fibrillation de fibres, quantité de fines et qualité des fines (fibrillaires ou floconneuses). Pendant le procédé de raffinage, le SAP développe sa surface et produit beaucoup de fines, l'EP développe sa surface mais produit peu de fines. C'est pourquoi l'influence du SAP est plus grande que celle de EP. La fibre du BOU étant courte et dure, elle produit des fines mais de qualité différente. En pratique, le C_Diff_2 du papier est une variable très complexe et dont l'explication n'est pas facile.

3.3 Effet des variables du procédé sur la qualité des pâtes et papiers

La figure 3.4 montre que sept composantes principales expliquent environ 45% de la variation dans les propriétés des pâtes. La figure 3.5 illustre que dix variables du

procédé ont une influence significative sur les propriétés de pâtes. La figure 3.6 présente le détail des relations entre les variables de procédé et les propriétés des pâtes.

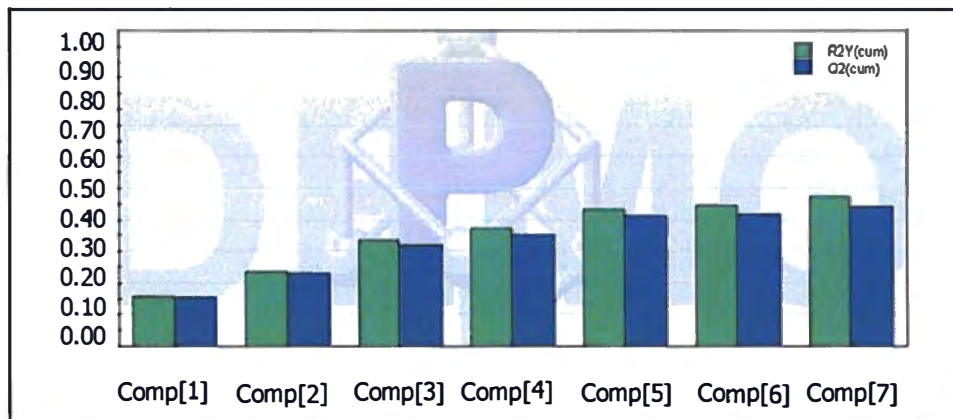


Figure 3.4 Sept composantes principales obtenues pour les dix variables du procédé

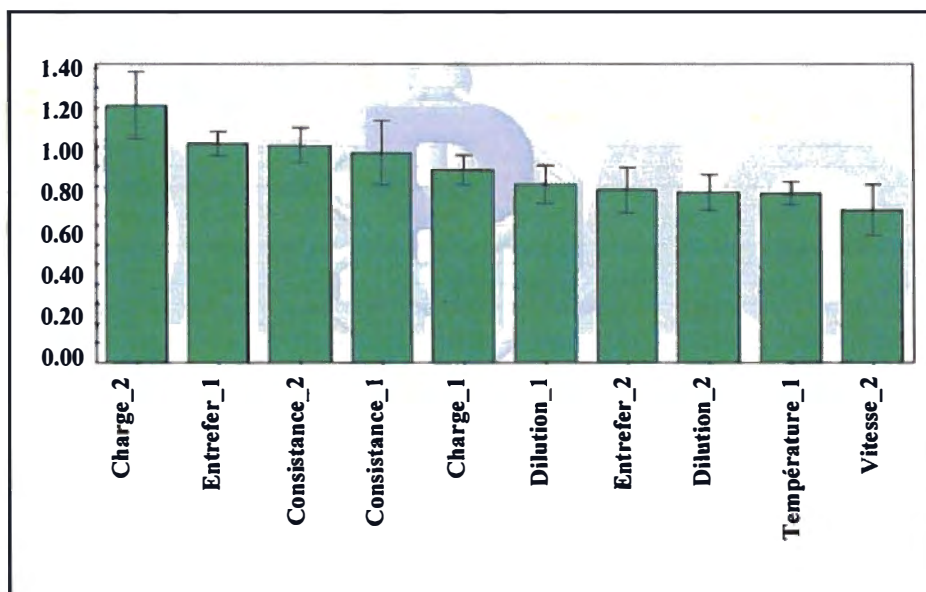


Figure 3.5 Importance relative des dix variables du procédé qui contribuent aux sept composantes principales

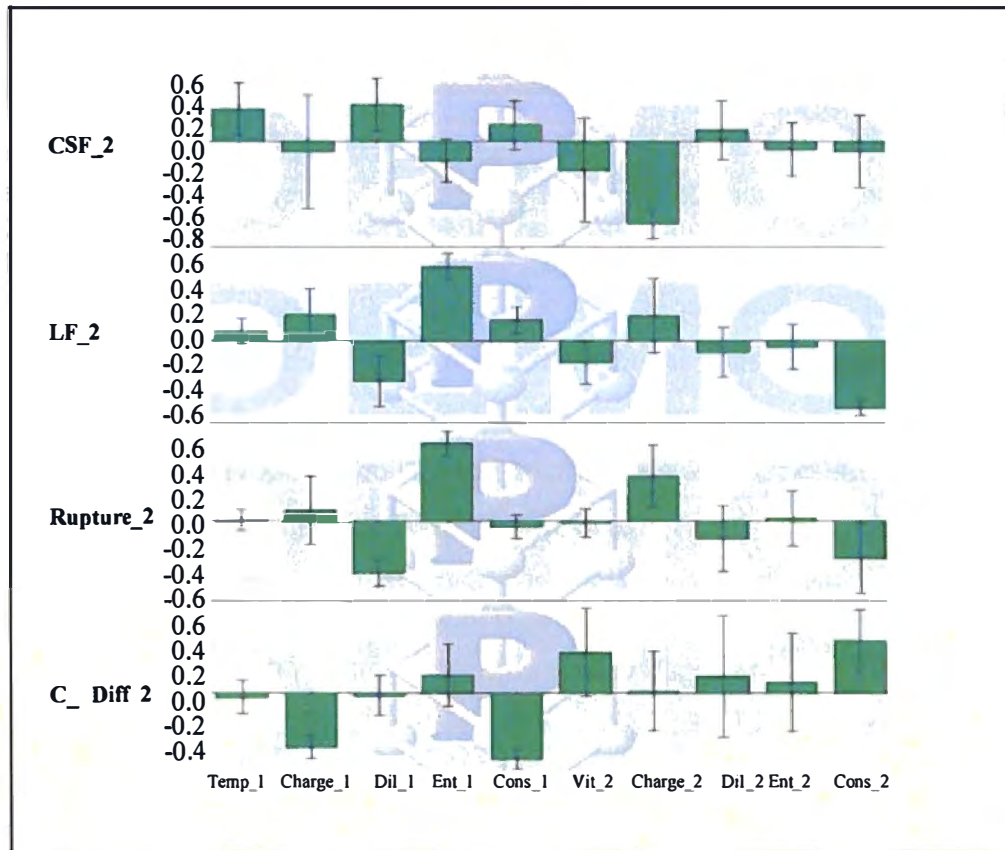


Figure 3.6 Relations entre les variables du procédé et les propriétés des pâtes et papiers

L'analyse des résultats montre que Charge_2 et Ent_1 sont les deux variables les plus influentes. Avec Ent_1 on peut contrôler la longueur des fibres (défibration), tandis que Charge_2 s'occupe du développement des surfaces des fibres (fibrillation), lequel influence à son tour le CSF_2. On remarque d'ailleurs une relation opposée entre Charge_2 et CSF_2, c'est à dire que l'augmentation de la Charge_2 fait diminuer le CSF_2.

3.3.1 Effets des paramètres de procédé du premier stade sur les propriétés des pâtes et papiers

Ent_1 : la réduction de l'Ent_1 favorise la coupe des fibres ce qui abaisse la moyenne de la longueur des fibres. En pratique, presque toutes les propriétés des pâtes et papiers sont reliées à la longueur des fibres [4]. En général, la minimisation de l'entrefer cause

affecte aussi le second stade. Pour maintenir la consistance Cons_2, une augmentation de Dil_1 se traduit par une diminution de Dil_2. Ceci fait augmenter la force centrifuge du stade_1 et diminuer la force centrifuge du stade_2 sur les fibres, réduit le temps de séjour des fibres, elles sont alors moins développées et CSF_2 augmente.

Temp_1 : la variation de température étant limitée (120 – 140°C), les résultats montrent que Temp_1 influence faiblement les propriétés des pâtes et papiers, sauf peut-être une relation positive entre Temp_1 et CSF_2. En principe, la température de mise en pâte peut affecter l'eau contenue dans les fibres, laquelle influence la structure des fibres associées, il y a donc une relation significative entre température et propriétés de papier [84, 85]. Entre 70 et 140 °C, l'augmentation de Temp_1 fait ramollir la lignine et facilite donc la séparation des fibres. Une température plus haute fait plier les fibres longues, cela affecte donc les propriétés des pâtes et surtout sur la longueur des fibres [86]. Dans cette recherche, Temp_1 change de 124 à 140 °C, mais dans la majorité des essais Temp_1 est fixée à 140 °C (en pratique, dans les usines, on ne change pas souvent la température, la température peut être regardée comme une constante). L'analyse multivariées montre donc peu de relation entre Temp_1 et les propriétés de pâte puisque Temp_1 a subi peu de variations dans les essais.

3.3.2 Effets des paramètres de procédé du second stade sur les propriétés des pâtes et papiers

En pratique, le second stade est utilisé pour améliorer le développement de la surface de la fibre. L'augmentation de la Charge_2 est donc le moyen généralement utilisé pour que les fibres soient plus développées.

Ent_2 : si on prend la base de données dans son ensemble, on trouve que la relation entre Ent_2 et les quatre propriétés des pâtes et papiers est peu significative (figure 3.6). Par contre, pour certain groupe d'essais, il existe une grande relation entre Ent_2 et les propriétés des pâtes et papiers (figure 3.7).

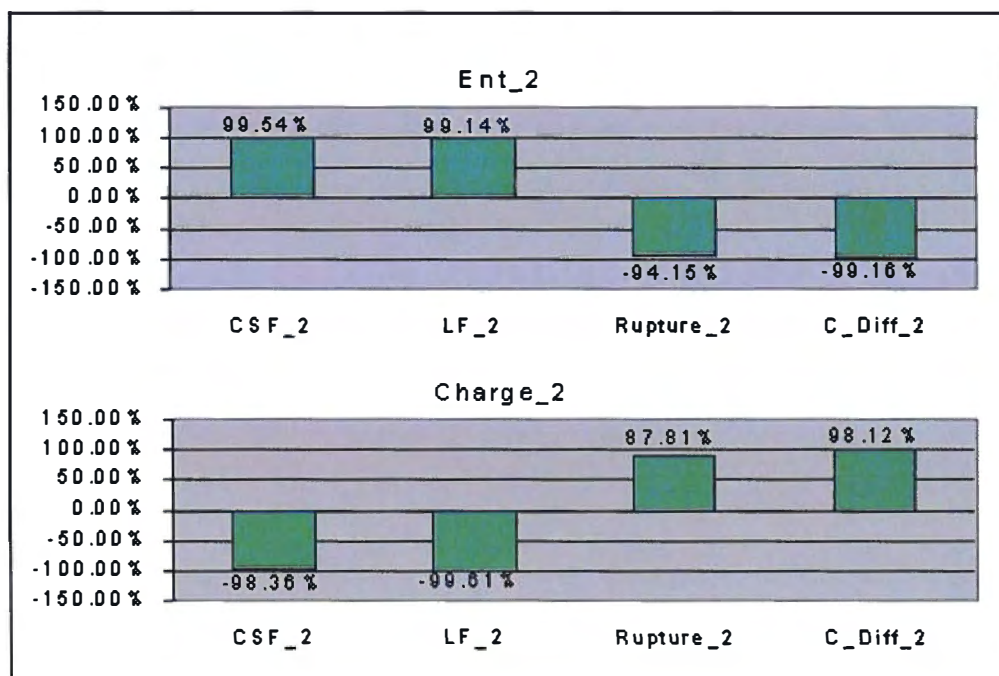


Figure 3.7 Les relations entre Ent_2, Charge_2 et les propriétés des pâtes et papiers dans le premier groupe d'essais

Charge_2 : la fonction essentielle de la Charge_2 est de développer la surface des fibres, afin d'améliorer les propriétés de la pâte finale. Cette conclusion a aussi été vérifiée par les résultats expérimentaux dans la figure 3.6. Il existe une relation négative très significative entre Charge_2 et CSF_2. L'augmentation de la Charge_2 est produite par une réduction de l'Ent_2, ce qui réduit la LF_2. Lorsqu'on applique plus d'énergie aux fibres, la surface spécifique des fibres est plus développée, et en conséquence CSF_2 diminue alors que Rupture_2 augmente. Dans la figure 3.6, on remarque aussi que la relation entre Charge_2 et LF_2 est positive, c'est à dire qu'une augmentation de la Charge_2 cause une augmentation de la LF_2. Cette situation est semblable à celle décrite pour ces deux variables au stade 1 et on peut d'ailleurs utiliser la même interprétation pour expliquer ce phénomène contradictoire. La figure 3.7 montre cependant clairement qu'il y a une relation très négative entre Charge_2 et Ent_2 dans un même groupe d'essais.

Dil_2 : les résultats expérimentaux présentent des relations plutôt faibles entre Dil_2 et les quatre propriétés des pâtes et papiers. On sait cependant que Cons_2 affecte

largement LF_2, Rupture_2 et C_Diff_2. Une augmentation de la Dil_2 se traduit par une diminution de la Cons_2, ce qui fait augmenter la force centrifuge et réduire le temps de séjour, donc augmenter l'intensité. Les fibres sont alors moins développées, et Rupture_2 et C_Diff_2 peuvent être diminués.

Cons_2 : la Cons_2 dépend de l'état de la pâte à l'entrée du stade_2, de l'énergie appliquée au second stade (vapeur produite), et de la Dil_2. Il est normal que les relations soient plus visibles avec la consistance qu'avec la dilution car avec cette dernière, la consistance d'entrée (Cons_1) et l'énergie ne sont pas pris en compte.

Vit_2 : à partir des résultats de recherche de Miles, l'intensité de raffinage est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation des plaques. Le nombre d'impact par unité de temps est donc en rapport avec la vitesse de rotation [87, 88]. Il en va de même pour le temps de séjour qui est inversement proportionnel au cube de la vitesse de rotation [89]. La figure 3.6 confirme ces relations. De façon plus détaillée, l'augmentation de la vitesse de rotation fait augmenter la force centrifuge, donc le temps de séjour diminue, le nombre d'impacts est réduit et l'énergie spécifique par impact augmente [90]. La plupart des valeurs de Vit_2 ont été fixées aux alentours de 3565 rpm, l'analyse multivariées montre donc que les relations entre Vit_2 et les propriétés des pâtes et papiers sont faibles.

3.4 Analyse combinée copeaux-procédé

Notons au passage qu'il est erroné de penser que la somme de la capacité prédictive provenant des copeaux (55%) et des variables du procédé (45%) atteigne 100% de la capacité prédictive totale. En effet, il s'agit ici d'un simple hasard puisqu'en réalité chaque groupe de variables présente un domaine d'explication dont une partie se recoupe nécessairement (figure 3.8). Par exemple, en utilisant seulement les pourcentages et caractéristiques des copeaux dans la base de données (paramètres de procédé constants), on peut prédire une variation de LF_2 de 1.2 à 1.5 mm. En utilisant seulement des paramètres de procédé (copeaux constants) on peut prédire une variation de 0.8 à 1.4 mm. Il existe donc une section commune entre les deux prédictions, de 1.2 à

1.4 mm. Donc la plage totale de prédiction sur LF_2 est $1.5 - 0.8 = 0.7$ mm et non pas $(1.5 - 1.2) + (1.4 - 0.8) = 0.9$ mm.

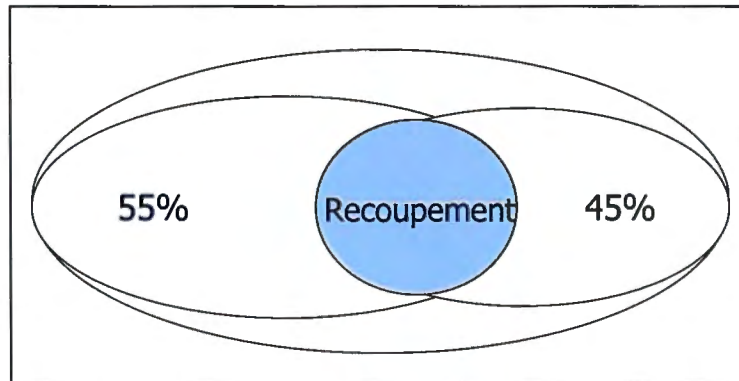


Figure 3.8 Recouvrement des domaines d'explication respectifs des copeaux et des variables du procédé

Une analyse de la relation entre chaque propriété des pâtes et papier et les autres variables (variables des copeaux et variables de procédé) a donc aussi été faite. Les résultats analytiques illustrent que sept composantes principales sont requises pour expliquer près de 80% de la variation dans les propriétés des pâtes et papiers (figure 3.9). Les influences respectives des paramètres de copeaux et de procédé sur les propriétés des pâtes et papiers sont montrées à la figure 3.10.

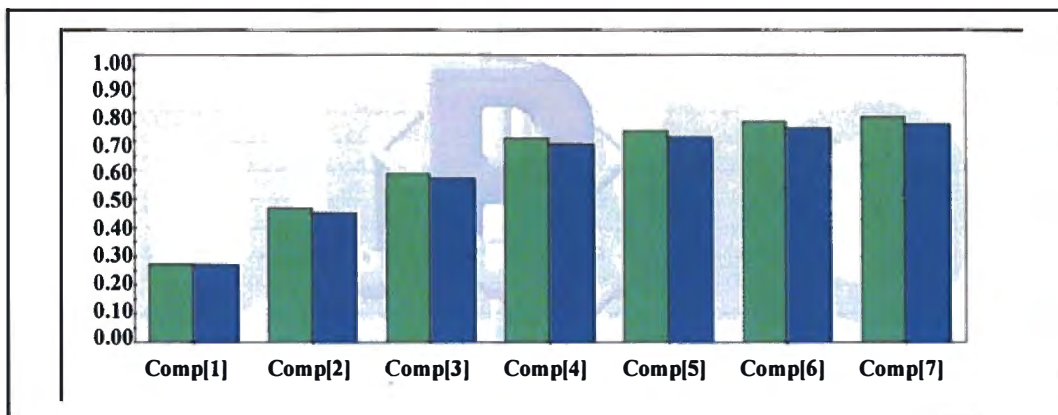


Figure 3.9 Sept composantes principales obtenues pour les vingt variables copeaux et procédé

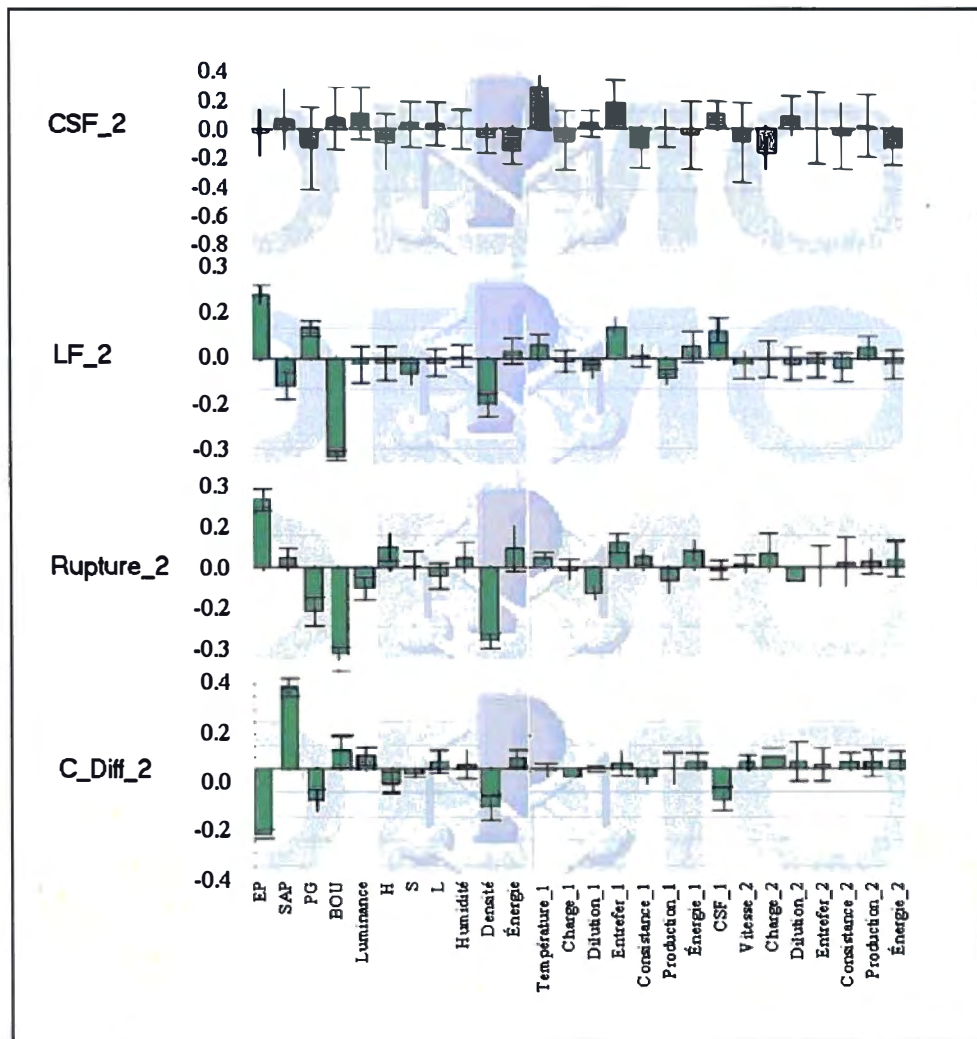


Figure 3.10 Comparaison des relations entre les propriétés de pâte et les variables des copeaux et de procédé

On peut conclure que les caractéristiques des copeaux, incluant les essences, affectent significativement les qualités de pâtes produites. Les propriétés des copeaux sont mêmes prédominantes comparativement aux paramètres du procédé. Cela suggère qu'un contrôleur du procédé qui utilise seulement les paramètres opératoires sera moins efficace pour maintenir la consigne désirée des propriétés de pâtes, et que les propriétés des copeaux seront alors regardées comme des perturbations avec une large influence.

En résumé, les résultats PLS montrent que :

1. Les essences et caractéristiques des copeaux influencent significativement les propriétés des pâtes et papiers;
2. LF_2 est largement influencée par les essences de bois et Ent_1 ; Ent_2 a une influence moins grande;
3. Dans les paramètres de procédé, Charge_2 est une variable des plus importante. Ajouter plus d'énergie (augmenter Charge_2) dans le second stade améliore le développement des fibres (diminution de CSF_2 et LF_2, augmentation de Rupture_2 et C_Diff_2);
4. Les relations entre les trois groupes de variables (copeaux, procédé et pâte) varient beaucoup d'un groupe d'essais à un autre ; les relations sont parfois même opposées entre un groupe d'essais et l'ensemble des essais.

3.5 Sélection des variables importantes

Dans un procédé de raffinage industriel, afin d'obtenir un produit uniforme, l'alimentation des copeaux est souvent fixée. C'est-à-dire que les variations dans les essences et les caractéristiques des copeaux sont limitées. La plupart des recherches antérieures ont donc pris cette façon de faire comme point de départ. Dans notre contexte, cela revient à dire que nous aurions étudié seulement un groupe d'essais. La recherche présentée ici est donc très différente. Elle utilise plusieurs groupes d'essais différents et les étudie dans leur ensemble. Un avantage est que les limites du domaine expérimental étudié sont beaucoup plus larges. Par contre, un effet incontournable est que certaines relations d'un groupe d'essais en particulier sont noyées dans la masse, ce qui peut à première vue faire croire à des relations anormales, comme vu dans les sections 3.3.1 et 3.3.2.

Dans notre étude, la motivation derrière l'utilisation d'un espace expérimental très large est que le contrôleur de l'usine pilote que l'on désire en tirer devrait être, à prime abord, très général. On doit donc premièrement étudier les relations générales entre les trois groupes des variables et choisir les variables les plus importantes avant d'établir un

modèle qui possède la capacité de prédire la qualité des pâtes et papiers (CSF_2, LF_2, Rupture_2 et C_Diff_2). La stratégie de contrôle pour minimiser l'erreur entre la qualité désirée et celle prédite pourra alors passer soit par une action sur les essences et leur pourcentage, soit par une action sur les paramètres de procédé, ou les deux. Ces stratégies seront présentées en détail aux chapitres 6 et 7.

Un des buts de l'analyse statistique réalisée dans ce chapitre est de choisir les variables importantes qui seront utilisées dans le modèle. Le tableau 3-4 montre les variables finales utilisées dans le modèle de raffinage. Leur utilisation dans des modèles directs ou inverses sera expliquée au chapitre suivant.

Tableau 3-4 Liste des variables retenues, leurs unités et leur rôle individuel

	Variables		Modèle inverse		Modèle direct	
	Nom	Unités	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie
S	EP	%	*		*	
	SAP	%	*		*	
	PG	%	*		*	
	BOU	%	*		*	
C	Luminance		*		*	
	H - Hue		*		*	
	S - Saturation		*		*	
	L - Luminance		*		*	
	Humidité	%	*		*	
	Densité	kg/m ³	*		*	
M	Consistance_1	%	*		*	
	Taux_Production_1	kg / min	*		*	
	Consistance_2	%	*		*	
	Taux_Production_2	kg / min	*		*	
V	Température_1	C		*	*	
	Dilution_1	US gal/min		*	*	
	Entrefiler_1	mm		*	*	
P	Energie_Spécifique	MJ/kg				*
	Charge_1	kW	*	*	*	
	Charge_2	kW	*	*	*	
V	Vitesse_2	m/s		*	*	
	Dilution_2	mL/min		*	*	
	Entrefiler_2	mm		*	*	
P	CSF_1	mL	*			*
	CSF_2	mL	*			*
	Longueur_Fibre_2	mm	*			*
	Rupture_2	Nm/g	*			*
	Coeff_Diffusion_2	m / kg	*			*

où:

S: mélange de copeaux;

C: caractéristiques des copeaux (mesurées par le CMS);

V: variables manipulées du procédé;

m: variables mesurées;

P: prédictions des propriétés des pâtes

3.6 Relations entre les caractéristiques des copeaux et les variables manipulées du procédé

On a aussi fait l'analyse des relations entre les caractéristiques des copeaux et les variables manipulées de procédé. Les résultats sont montrés dans la figure 3.11.

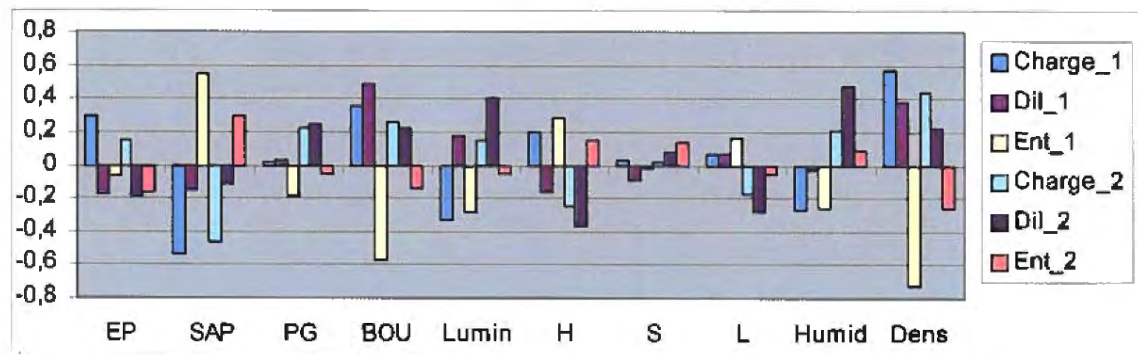


Figure 3.11 Relations entre les caractéristiques des copeaux et les variables manipulées du procédé

La raison de cette analyse est que des modèles inverses sont employés dans le contrôleur développé pour donner une première estimation des variables manipulées du procédé.

Dans la figure 3.11, on voit qu'il y a une grande relation entre l'essence du bois et les paramètres de procédé, par exemple, EP et Charge_1, SAP et Charge_1, SAP et Ent_1, SAP et Charge_2, SAP et Ent_2, BOU et Ent_1, BOU et Charge_1, BOU et Dil_1.

On voit qu'il existe également une relation entre les caractéristiques des copeaux (particulièrement la densité) et les paramètres de procédé. C'est-à-dire que pendant l'opération, même si les mélanges demeurent les mêmes, les variables CMS des copeaux changent, et donc pour garder la même qualité de pâte on doit ajuster les variables manipulées de procédé.

Dans les modèles inverses, les caractéristiques des copeaux et les consignes des pâtes et papiers sont les entrées, les variables manipulées de procédé sont les sorties. Les estimations des variables manipulées de procédé sont donc basées non seulement sur la variation de qualité des pâtes, mais aussi sur les variations des caractéristiques des copeaux.

3.7 Relations entre les quatre propriétés des pâtes et papiers

Le papier est produit à partir de la pâte, alors il peut exister une très grande relation entre les propriétés des pâtes et celles des papiers. Par exemple, le coefficient de diffusion est une fonction bien définie de la longueur de fibre. L'augmentation du contenu en fibres longues apporte une diminution relative du coefficient de diffusion. Pour une essence de bois fixe, le coefficient de diffusion est alors affecté par l'énergie spécifique et donc le CSF [91].

La figure suivante présente les relations entre l'énergie spécifique totale Ener_tot et les variables d'intérêt CSF_2, LF_2, Rupture_2 et C_Diff_2.

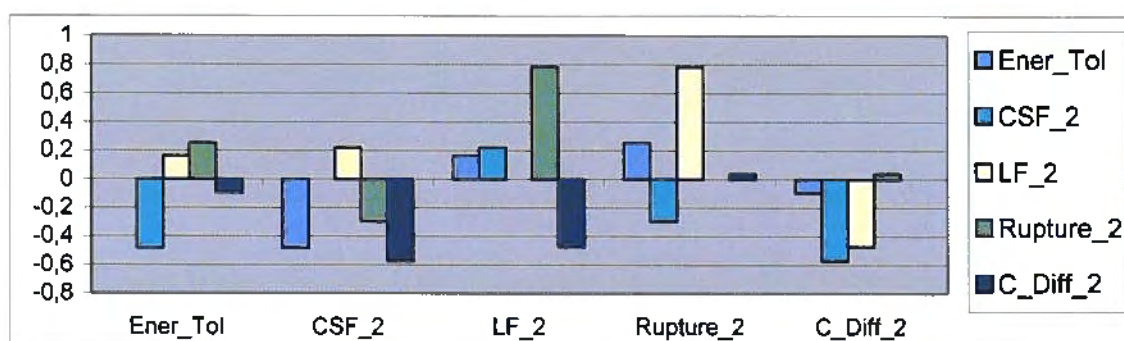


Figure 3.12 Relations entre les propriétés des pâtes et papiers

Les résultats montrent que Ener_Tot affecte largement CSF_2, qu'il existe une très grande relation entre LF_2 et Rupture_2, et que la relation entre LF_2, CSF_2 et C_Diff_2 est significative. Pour expliquer ceci, notons que l'augmentation de l'énergie totale aide à développer les surfaces des fibres, ce qui affecte directement CSF_2. LF_2 plus élevée amène plus de liaisons entre les fibres, donc Rupture_2 augmente. Par contre le papier devient plus rugueux, donc C_Diff_2 diminue. Inversement, une réduction de CSF_2 signifie une augmentation du développement des surfaces des fibres, les surfaces des fibres deviennent moins lisses, et donc dans ce cas si LF_2 est maintenue, Rupture_2 et C_Diff_2 augmentent.

Ces relations ont un impact direct sur les stratégies de contrôle. En effet, dans cette recherche, LF_2, CSF_2, Rupture_2 et C_Diff_2 sont les consignes. Afin d'obtenir la qualité désirée de papier, par exemple pour réaliser la consigne de C_Diff_2 = 60, les analyses effectuées dans ce chapitre nous montrent qu'il y aurait trois manières de procéder:

- 1) moduler les essences de copeaux;
- 2) ajuster les variables manipulées du procédé;
- 3) changer LF_2.

Mais puisque LF_2 est aussi une consigne, on constate que certaines combinaisons de qualité de pâtes et papiers seront alors impossibles à satisfaire simultanément et qu'on devra parfois faire des compromis.

Chapitre 4 Modélisation par réseaux de neurones

Le chapitre précédent a présenté les relations principales parmi les trois groupes de variables: les caractéristiques des copeaux, les variables du procédé et les propriétés des pâtes et papiers. En se basant sur ces relations entre les trois groupes, on peut maintenant sélectionner les entrées-sorties pour chaque modèle.

Chaque réseaux de neurones a été entraîné à reproduire les essais de la base de données à l'intérieur d'une erreur moyenne [92]. Avant chaque phase d'entraînement de ces réseaux, une série de 20% des données a été retirée de la base de données. Cette série «cachée» a ensuite été présentée aux réseaux pour fins de validation du modèle. Chaque modèle a été testé à l'aide de trois séries cachées différentes.

Le développement des modèles a suivi quatre étapes essentielles: conception du modèle statique avec la base de données initiale (section 4.1), conception du modèle statique avec la base de données modifiée (section 4.2), validation des modèles (section 4.3) et conception du modèle de mélange des copeaux (section 4.4).

Dans la première étape, en se basant à la fois sur les données expérimentales, sur les résultats analytiques multivariés du chapitre précédent ainsi que sur les références dans la littérature, deux types de modèles de réseaux de neurones ont été développés: modèles inverses et modèles directs. Ces deux types de modèles servent à simuler les caractéristiques du procédé de PTM et permettent de prédire les variables manipulées du procédé (calculées par le modèle inverse) et les propriétés des pâtes et papiers (générées par le modèle direct).

4.1 Modèles statiques avec base de données initiale

Les modèles de la première étape servent à prédire les variables manipulées des deux stades (entrefer, dilution, température et vitesse de rotation) ainsi que l'état de la pâte à la sortie des deux stades (indice d'égouttage CSF, longueur de fibre, indice de rupture et coefficient de diffusion). Dans cette phase, chaque modèle tente de généraliser les données issues du plan expérimental.

4.1.1 Modèles du premier stade

Un premier modèle direct Charge_1 utilise diverses variables des copeaux et du procédé, tel que montré à la figure 4.1. Au total, ce RDN comporte 18 entrées, 1 sortie et 10 neurones cachés. Ce RDN reproduit la base de données avec une erreur moyenne de 8%.

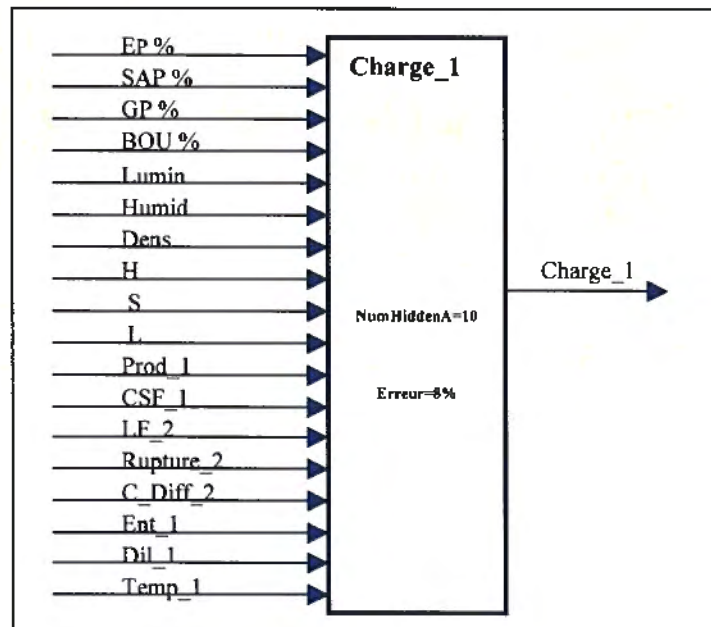


Figure 4.1 Modèle direct de la Charge_1

Un modèle inverse Stade_1 est également utilisé pour donner une estimation des variables manipulées du procédé (figure 4.2). Ce modèle possède 17 entrées, 3 sorties et 10 neurones cachés. Ce modèle reproduit les données avec une moyenne d'erreur de 6.5%.

La figure 4.3 montre le modèle direct de Pâte_1, lequel a 16 entrées et 2 sorties, avec 10 neurones cachés et une erreur de 9%. Les variables d'entrée de ce modèle incluent encore ici les variables des copeaux ainsi que la plupart des variables de procédé. Les deux sorties sont les propriétés des pâtes à la sortie du premier stade. Encore ici le choix des entrées est basé sur l'analyse multivariables.

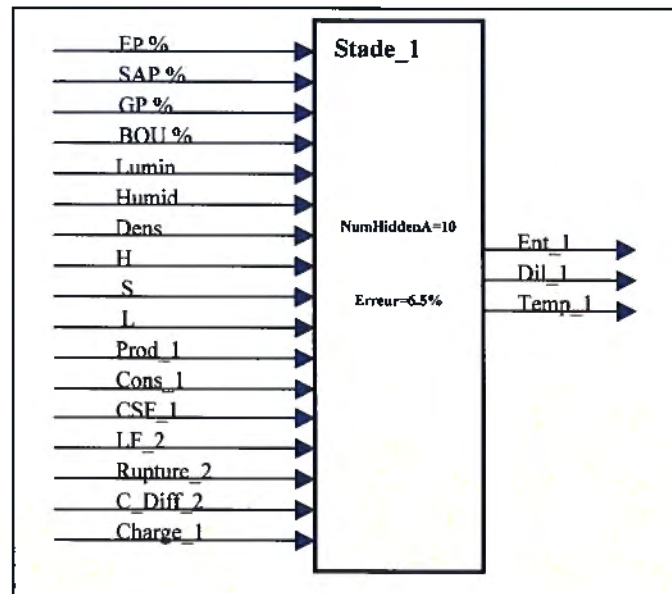


Figure 4.2 Modèle inverse du Stade_1

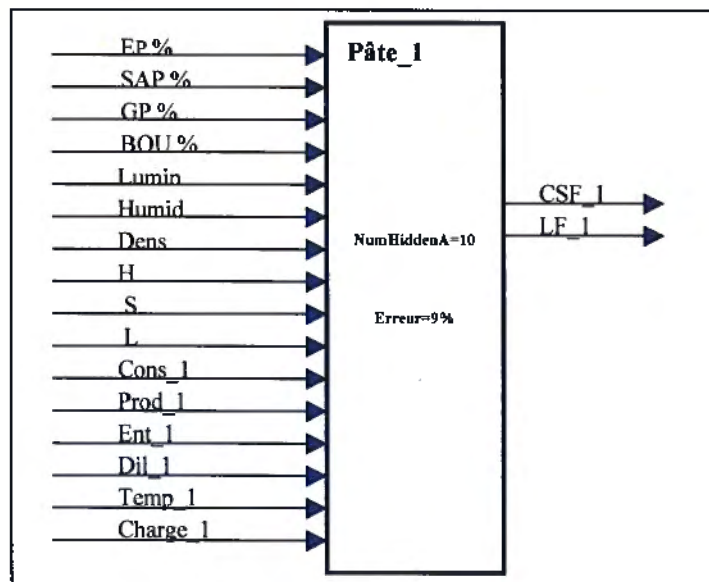


Figure 4.3 Modèle direct de Pâte_1

4.1.2 Intégration des modèles du premier stade

Les trois premiers modèles peuvent simuler les données expérimentales du premier stade de raffinage. En pratique, on ne mesure pas LF_1 en ligne en usine. Cette valeur ne fait pas non plus partie de la base de données. Dans ce cas, on ne peut pas considérer cette variable comme une consigne et elle devient alors simplement une valeur de référence générée par le modèle de Pâte_1. La figure 4.4 présente les liens entre les trois modèles du premier stade.

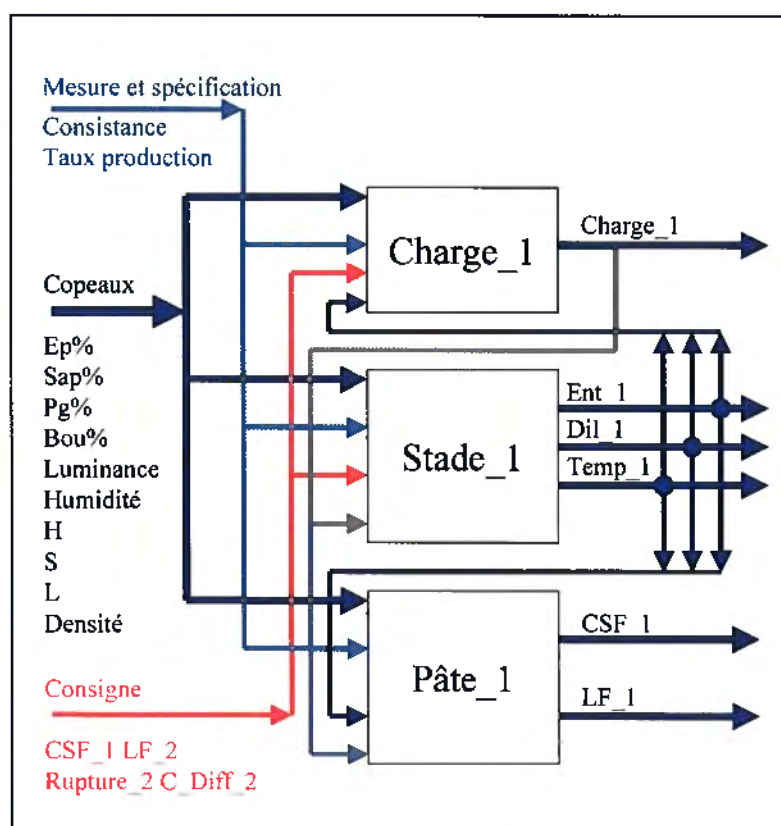


Figure 4.4 Lien entre les trois modèles du premier stade

Ces modèles servent à anticiper les propriétés de la pâte CSF_1 et LF_1 et ils feront donc partie des contrôleurs par anticipation décrits au chapitre 6.

On remarque un cycle créé entre le modèle direct Charge_1 et le modèle inverse Stade_1. Ces modèles sont exécutés dans un simulateur séquentiel modulaire (Cadsim Plus). Comme pour tout simulateur de ce type, les cycles sont problématiques puisqu'à l'itération « k » certaines variables nécessaires au calcul d'un modèle ne seront connues

qu'à l'itération subséquente « k+1 ». C'est le cas du modèle pour Charge_1, dont la valeur ne peut être obtenue qu'après l'exécution du modèle Stade_1, qui lui-même doit connaître le résultat de Charge_1 pour évaluer les valeurs de Dil_1, Temp_1 et Ent_1. En simulation séquentielle modulaire, ces cycles sont alors « coupés » par l'engin de solution et des méthodes itératives permettent de converger vers des valeurs satisfaisant les 2 modèles en même temps. Parmi ces méthodes, on note la substitution successive, l'algorithme de Wegstein, ou encore la méthode de Newton-Raphson [93]. La méthode utilisée par Cadsim Plus est inconnue de l'auteur mais il a été constaté que l'exécution du contrôleur par anticipation dans lequel ce cycle apparaît ne comportait pas de problèmes de convergence ou d'instabilité.

4.1.3 Modèles du second stade

Les modèles de second stade (stade_2) incluent un modèle direct Charge_2 (figure 4.5) et un modèle inverse Stade_2 (figure 4.6). Le modèle de Charge_2 est utilisé pour prédire la charge initiale du moteur du Stade_2. D'après les analyses multivariées, des relations significatives existent entre la Charge_2 et les trois catégories des variables: les propriétés de copeaux, les variables du procédé et les qualités de pâtes et papiers. De plus, il y a aussi une interaction significative entre la Charge_2 et les trois autres variables manipulées du procédé (Ent_2, Dil_2 et Vit_2). Le modèle de Charge_2 possède un total de 21 entrées, 10 neurones cachés et une erreur de 6%.

Le modèle de Stade_2 a pour sa part 16 entrées et 3 sorties. La moyenne d'erreur de simulation de ce modèle est de 6.5%.

La figure 4.7 présente les liens entre les modèles de Charge_2 et Stade_2. Les entrées de CSF_1 et LF_1 proviennent du modèle de Pâte_1.

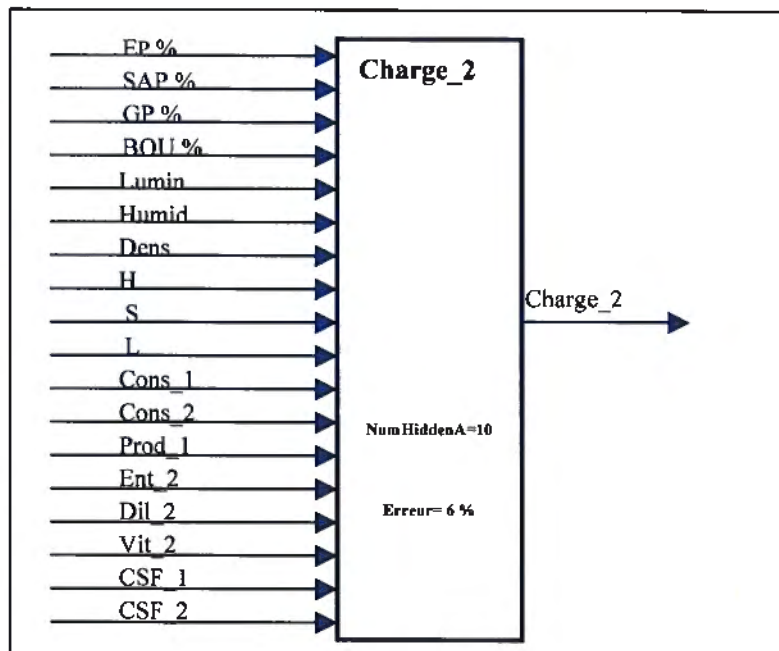


Figure 4.5 Modèle de Charge_2

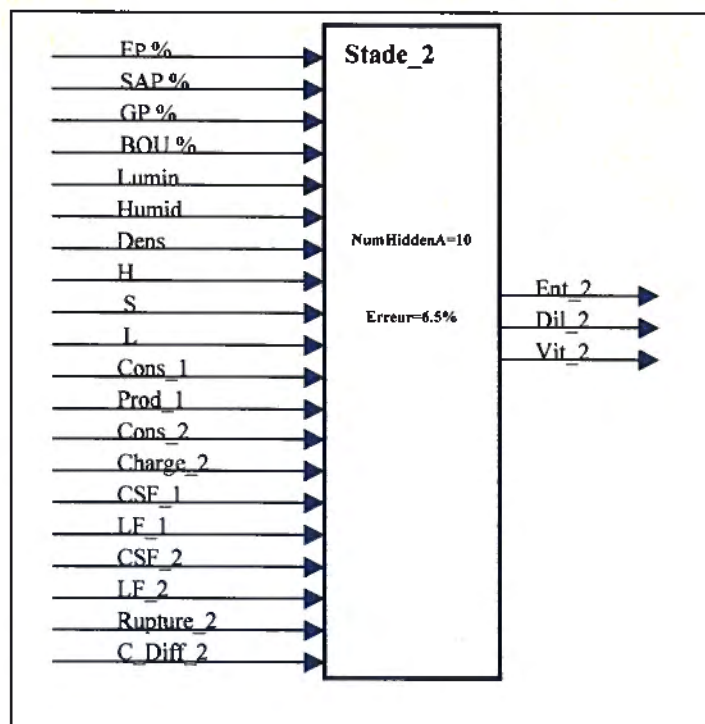


Figure 4.6 Modèle de Stade_2

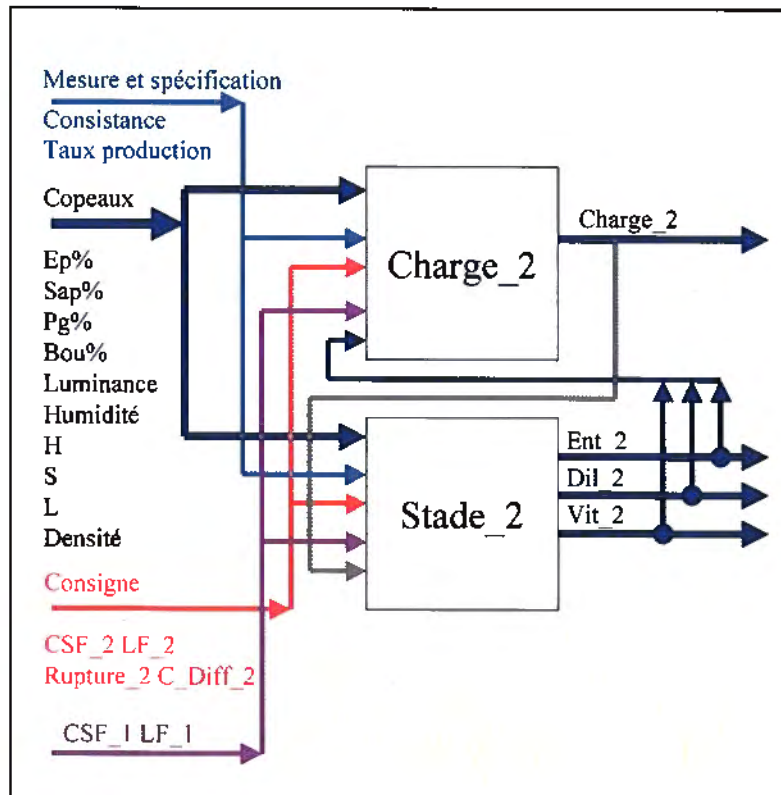


Figure 4.7 Lien entre les deux modèles du second stade

4.1.4 Modèles de prédiction des propriétés des pâtes et papiers

Les modèles qui servent à anticiper les valeurs de cinq variables associées aux propriétés finales des pâte et papiers ($Ener_Sp_Tot$, CSF_2 , LF_2 , $Rupture_2$ et C_Diff_2) vont maintenant être décrits.

L'énergie spécifique (KJ / kg ou MJ / tonne) est reliée à la charge de moteur et au taux de production. L'analyse multivariable a permis de découvrir qu'il y a aussi des relations significatives entre l'énergie spécifique et les propriétés des copeaux, la $Cons_1$ et l' Ent_2 . La figure 4.8 présente le modèle $Ener_Sp_Tot$, dont 2 des entrées sont évidemment $charge_1$ et $charge_2$. On aurait pu aussi construire un RDN par addition de $Ener_1$ avec $Ener_2$, mais dans ce cas il aurait fallu établir deux autres modèles (pour $Ener_1$ et $Ener_2$).

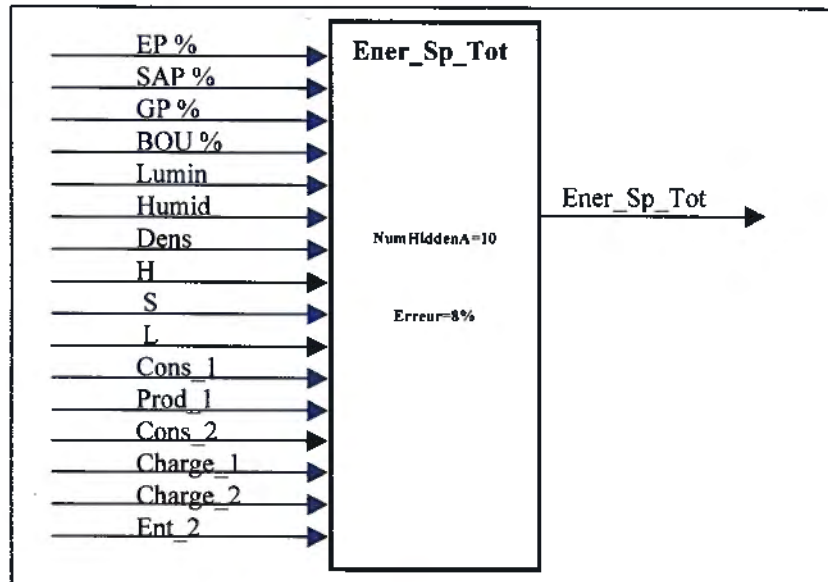


Figure 4.8 Modèle Ener_Sp_Tot

La figure 4.9 présente le modèle de Pâte_2, qui sert à anticiper les propriétés finales des pâtes CSF_2 et LF_2. Ce modèle possède une moyenne d'erreur de simulation de 8%.

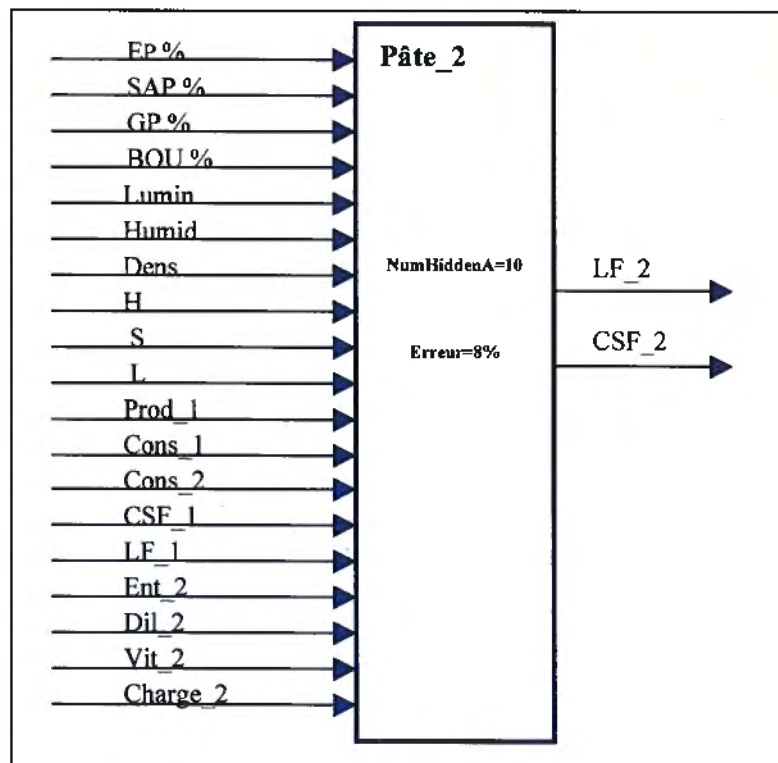


Figure 4.9 Modèle de Pâte_2

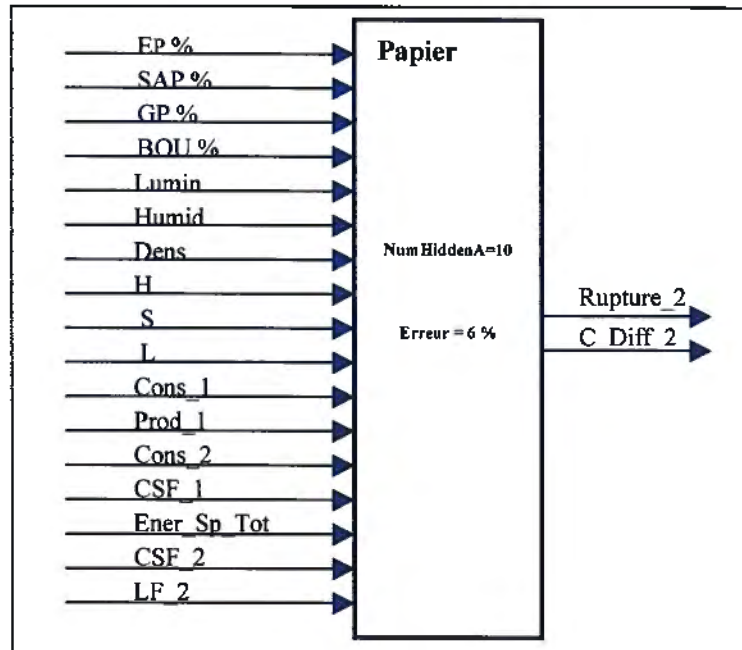


Figure 4.10 Modèle de papier

Le modèle de papier (figure 4.10) peut être utilisé pour prédire deux propriétés du papier, l'indice de rupture et le coefficient de diffusion (Rupture_2 et C_Diff_2).

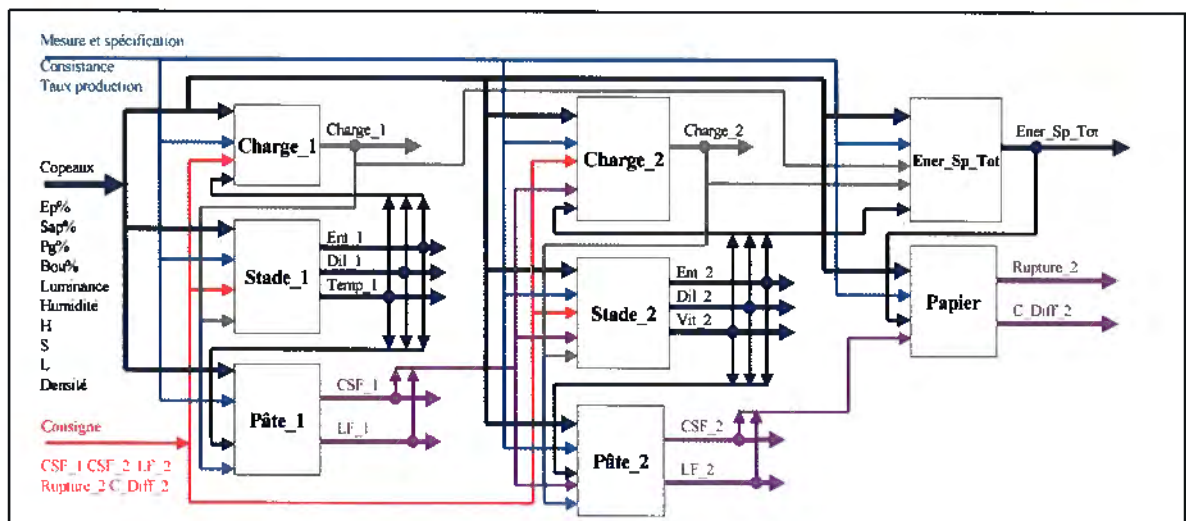


Figure 4.11 Structure des modèles statiques

Le papier est produit par la pâte, la qualité du papier est donc décidée largement par la qualité de pâte, elle-même fonction de l'énergie spécifique, des propriétés des copeaux

et du taux de production. La figure 4.11 montre la structure finale et les liens entre les modèles statiques sous forme d'un diagramme d'écoulement.

4.2 Modèle statique avec base de données modifiée

Le modèle de Pâte_1 peut servir au contrôle par anticipation de CSF_1 et LF_1, en anticipant les variables manipulées Charge_1 et Ent_1. De façon similaire, le modèle de Pâte_2 peut servir au contrôle par anticipation de CSF_2 et LF_2, en anticipant les variables manipulées Charge_2 et Ent_2. Le contrôle continu de ces variables comporte certaines exigences tant sur les données d'apprentissage que sur les modèles RDN qui en résultent.

Comme discuté au chapitre 3, les données expérimentales sont obtenues en groupe d'essais. Pour certains groupes du premier stade, les valeurs de certaines variables sont les mêmes (tableau 3-2). Cela veut dire que dans certains groupes il n'y a pas de variation sur certaines variables du stade 1. Or un modèle RDN ne peut être construit avec des données dont la variation est trop faible. Dans le cas présent, si on utilise des propriétés de copeaux et les variables manipulées d'un groupe d'essai pour obtenir une valeur de CSF_1 d'un autre groupe, une grande erreur est observée dans les modèles de la figure 4.3, et donc dans le contrôle par anticipation qui s'en suit. En d'autres termes, la structure des groupes d'essais fait parfois en sorte que les points à reproduire par les RDN sont à l'extérieur du domaine d'apprentissage de ces derniers.

Une autre complication réside dans le manque de points pour certaines régions du domaine d'apprentissage. Supposons des données parfaites, donc avec erreur nulle. La figure 4.12 montre que si on a assez de points, on peut généralement simuler plus précisément la courbe expérimentale désirée (courbe passant par 1, 2, 3, 4, 5 et 6). Mais si on a seulement 3 points (1, 4 et 6), bien que le modèle puisse simuler la relation entre CSF_2 et Ent_2 autour ces trois points, les courbes modélisées peuvent dévier de la courbe réelle.

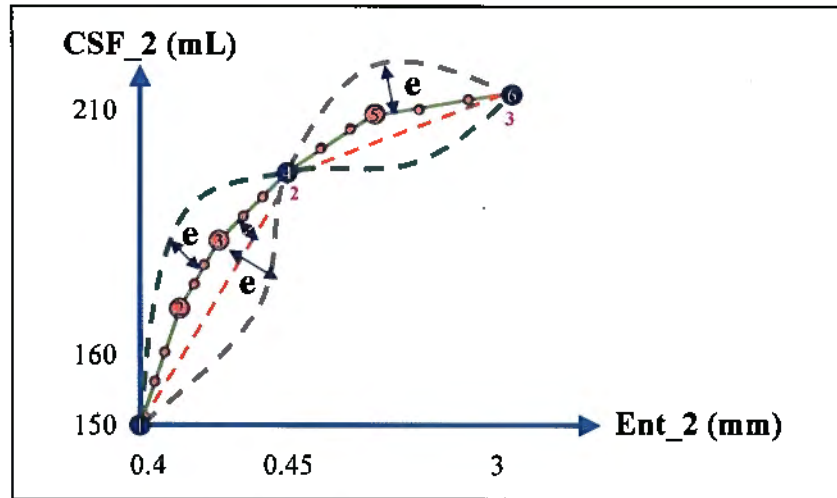


Figure 4.12 Modèles différents selon le nombre de points d'apprentissage

Une troisième complication réside dans certaines incohérences de la base de données, dont les principales sont montrées au tableau 4-1

Tableau 4-1 Incobérences de certaines valeurs dans la base de données

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	IDBatch	EP	SAP	S	L	Humid	Dens	Charge_2	Dil_2	Ent_2	CSF_2	LF_2	Rupture_2	C_Diff_2
2	10	0	60	108.5	51.0	50.16	0.40	18	1516	2	154.00	1.08	23.91	55.95
3	10	0	60	108.5	51.0	50.16	0.40	22	1516	0.8	152.00	1.12	24.11	56.19
4	10	0	60	108.5	51.0	50.16	0.40	28	1516	0.6	108.00	1.13	30.41	58.21
5	10	0	60	108.5	51.0	50.16	0.40	30	1516	0.5	86.00	1.13	29.25	59.87
6	35	0	100	121.6	32.2	70.34	0.33	20	1895	3	201.00	1.56	37.44	57.90
7	35	0	100	121.6	32.2	70.34	0.33	30	1895	0.6	145.00	1.56	39.97	58.96
8	35	0	100	121.6	32.2	70.34	0.33	36	1895	0.52	121.00	1.53	41.94	62.07
9	35	0	100	121.6	32.2	70.34	0.33	42	1895	0.48	90.00	1.46	45.58	62.13
10	100	0	100	156.4	22.0	63.58	0.33	20	1516	3	218.00	1.61	39.40	53.88
11	100	0	100	156.4	22.0	63.58	0.33	28	1516	0.6	178.00	1.57	42.85	56.71
12	100	0	100	156.4	22.0	63.58	0.33	28	948	0.55	159.00	1.56	43.29	57.87
13	100	0	100	156.4	22.0	63.58	0.33	34	948	0.5	117.00	1.48	48.50	59.71
14	15-1	100	0	89.9	67.7	38.06	0.38	16.2	1400	4.00	229	1.89	36.84	50.9
15	15-5	100	0	89.9	67.7	38.06	0.38	23.6	1400	0.60	193	1.93	42.17	50.7
16	15-7	100	0	89.9	67.7	38.06	0.38	31.2	1400	0.55	157	1.85	45.33	53.6
17	15-9	100	0	89.9	67.7	38.06	0.38	39.4	1400	0.50	127	1.77	47.32	54.6

On peut voir que certains groupes d'essais présentent des sauts énormes des valeurs de Ent_2. Ces valeurs éloignées sont normalement rejetées par un RDN. En conséquence, en prenant le groupe d'essai 10 en exemple, tous les points ayant une coordonnée entre

0.8 mm et 2 mm seront difficilement généralisables, puisque le RDN aura tendance à rejeter la coordonnée 2mm dans son apprentissage.

4.2.1 Conception d'un régulateur proportionnel

Pour combler ces lacunes, un régulateur proportionnel a été créé, lequel peut calculer les variations proportionnelles entre Charge_1, Ent_1 et CSF_1, de sorte qu'on peut minimiser l'erreur de simulation.

En usine pilote, CSF_1 est contrôlé par Charge_1, lui-même contrôlé par Ent_1. Dans chaque groupe d'essai, Ent_1, Dil_1, Temp_1, Charge_1 et CSF_1 sont généralement constants. Donc pour chaque groupe d'essais du stade 1, il existe une équation unique qui relie les entrées et les sorties. Par exemple, pour décrire CSF_1 d'un groupe, le modèle Pâte_1 peut utiliser la régression suivante:

$$A(EP\%) + B(SAP\%) + C(PG\%) + D(BOU\%) + E(Lumin) + F(H) + G(S) + H(H) + I(L) + J(Humid) + K(Dens) + L(Cons_1) + M(Charge_1) = CSF_1 \quad \text{Équation 4.1}$$

où A, B, C...M sont les paramètres de pondération générés par le modèle. Dans un groupe d'essais, si les informations des copeaux, les variables de procédé, et les propriétés de pâte sont identiques, alors les paramètres de pondération ci-haut devraient être les mêmes. Dans ce cas on peut prendre les résultats simulés (générés par les modèles Charge_1, Stade_1 et Pâte_1) comme les valeurs initiales pour un certain groupe d'essais. S'il y a une erreur importante entre CSF_1 simulé et sa consigne désirée, on peut ajuster Charge_1 proportionnellement pour minimiser cette erreur. Le modèle R_P (régulateur proportionnel) se charge de trouver ce rapport.

Avant d'appliquer cette technique, il a fallu étudier si ce rapport était le même pour des groupes d'essais différents. Il s'est avéré que les rapports ne sont pas identiques. La figure 4.13 montre la comparaison des relations entre charge_1 et CSF_1 pour les groupes d'essais 2 et 10 de la base de données.

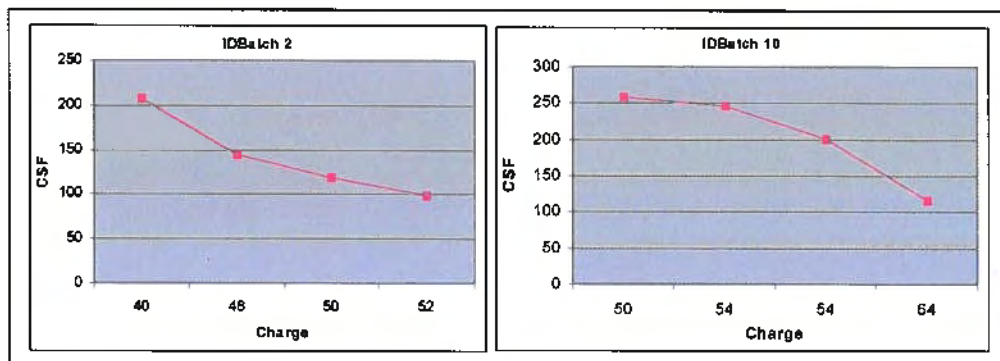


Figure 4.13 Comparaison des relations entre Charge_1 et CSF_1 de deux groupes d'essais différents

Par exemple, dans le groupe d'essais 2, $\text{Charge}_1 = 52 - 40 = 12\text{kw}$, $\text{CSF}_1 = 207 - 98 = 109\text{mL}$; Dans le groupe d'essais 10, $\text{Charge}_1 = 64 - 50 = 14\text{kw}$, $\text{CSF}_1 = 258 - 115 = 143\text{mL}$. C'est donc dire que dans le groupe d'essais 2, augmenter la charge de 12kw fait diminuer le CSF de 109 mL, alors que dans le groupe d'essais 10, augmenter la charge de 14kw charge fait diminuer le CSF de 143mL. Le rapport de proportionnalité recherché entre CSF et Charge dans le groupe d'essais 2 est donc $109 / 12 = 9.083$; mais dans le groupe d'essais 10 ce rapport est $143 / 14 = 10.214$.

En prenant le groupe d'essais 2 en exemple, si la consigne de CSF_1 est fixée à 200mL, alors en sachant que les valeurs initiales sur CSF_1 et Charge_1 sont de 210mL et 39kw dans ce groupe, et que le modèle R_P donne un rapport de 9.083 pour ce groupe, on peut dès lors minimiser l'erreur de CSF ($210 - 200 = 10\text{mL}$) en augmentant la $\text{Charge}_1 = 39 + 10 / 9.083 = 40.1\text{kw}$. Bien sûr la valeur de Ent_1 doit être réduite de façon correspondante (en assumant que Dil_1 et Temp_1 sont fixées). Le modèle R_P utilise donc le même principe pour déterminer le rapport entre Charge_1 et Entrefe_1 pour chaque groupe. La figure suivante présente le modèle R_P qui peut générer ces deux rapports. La boucle formée par les modèles Stade_1 et Charge_1 (figures 4.1 et 4.2) se charge de converger vers les valeurs finales qui satisfont simultanément les 2 modèles.

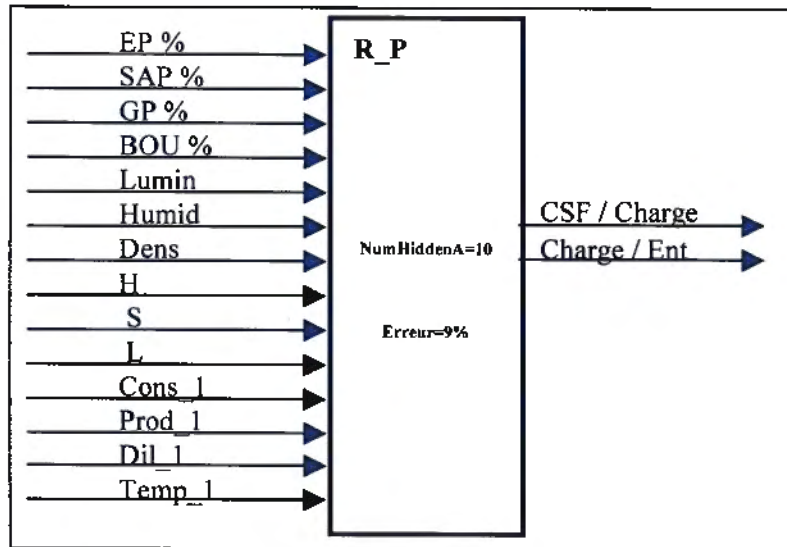


Figure 4.14 Le modèle régulateur proportionnel

Le modèle R_P peut calculer les deux rapports avec une erreur moyenne de simulation de 9%.

Pour entraîner ce modèle, on a dû réarranger la base de données de façon à ce que chaque groupe d'essais du stade 1 présente seulement une ligne (non plus quatre lignes). On a aussi dû ajouter des colonnes pour les rapports CSF / Charge et Charge / Ent, dont les valeurs sont données par:

$$\text{CSF / Charge} = (\text{CSFmax} - \text{CSFmin}) / (\text{Chargemax} - \text{Chargemin}) \quad \text{Équation 4.2}$$

$$\text{Charge / Ent} = (\text{Chargemax} - \text{Chargemin}) / (\text{Entmax} - \text{Entmin}) \quad \text{Équation 4.3}$$

où:

CSFmax : la valeur maximale du CSF dans le groupe d'essai ;

CSFmin : la valeur minimale du CSF dans le groupe d'essai ;

Chargemax : la valeur maximale de la Charge dans le groupe d'essai ;

Chargemin : la valeur minimale de la Charge dans le groupe d'essai ;

Entmax : la valeur maximale de l'Ent dans le groupe d'essai ;

Entmin : la valeur minimale de l'Ent dans le groupe d'essai.

Le tableau suivant montre une partie des nouvelles données utilisées pour entraîner le modèle R_P.

Tableau 4-2 Une partie des nouvelles données pour entraîner le modèle R_P

inEP	inSAP	inPG	inBOU	inMoisture	inDens	inLumin	inS	inL	inH	outCharge/Ent	outCSF/Charge
0	20	40	40	48.85	0.447	52.0	108.7	51.9	22.1	120.00	8.08
0	0	100	0	48.93	0.442	57.9	105.8	58.5	21.4	200.00	6.94
0	0	0	100	53.35	0.509	47.5	125.7	43.5	22.4	175.00	10.29
100	0	0	0	49.23	0.383	51.3	103.4	51.3	21.7	180.00	4.50
0	100	0	0	48.62	0.334	56.5	98.9	56.5	22.2	62.50	6.80
60	0	0	40	48.37	0.433	50.9	109.1	51.1	22.1	325.00	4.85
0	60	40	0	47.52	0.377	56.1	100.4	57.1	22.0	72.73	9.43
60	0	40	0	47.09	0.407	54.7	103.5	56.4	21.6	325.00	7.19
0	60	0	40	50.16	0.404	52.4	108.5	51.0	22.3	24.00	5.67
20	0	40	40	49.12	0.457	53.0	111.7	52.8	21.9	428.57	3.73
100	0	0	0	44.39	0.383	52.8	102.0	56.3	21.7	250.00	9.30
0	100	0	0	50.29	0.334	56.6	100.0	55.4	22.2	250.00	7.50
0	20	40	40	58.90	0.447	46.0	125.4	38.5	21.7	166.67	5.25
100	0	0	0	62.12	0.383	48.5	122.6	39.2	21.1	287.50	5.65
0	100	0	0	62.44	0.334	52.8	116.7	42.6	21.8	113.33	6.06
60	0	0	40	63.33	0.433	47.0	128.6	36.4	21.3	275.00	6.82
0	60	40	0	62.99	0.377	49.9	122.5	39.6	21.5	320.00	4.06
60	0	40	0	60.53	0.407	48.7	124.3	40.5	21.1	190.00	5.95
0	60	0	40	63.42	0.404	48.5	123.5	37.6	21.7	30.00	5.47
20	0	40	40	60.09	0.457	48.0	126.5	39.7	21.6	275.00	3.50
100	0	0	0	63.37	0.383	48.9	123.5	38.6	21.1	225.00	7.61
0	100	0	0	64.65	0.334	51.7	119.1	40.0	21.6	133.33	5.90
0	0	100	0	61.84	0.442	50.7	129.2	41.8	21.0	328.57	6.31
0	0	0	100	61.17	0.509	45.9	134.7	36.2	22.0	92.31	10.00
0	20	40	40	66.86	0.447	42.5	124.1	29.5	21.1	173.33	4.58

4.2.2 Compléments de logique

Le modèle R_P peut donner le rapport de la variation, mais il ne peut pas déterminer le sens de ce rapport (positif ou négatif). Une logique est donc utilisée pour déterminer ce sens (figure 4.15).

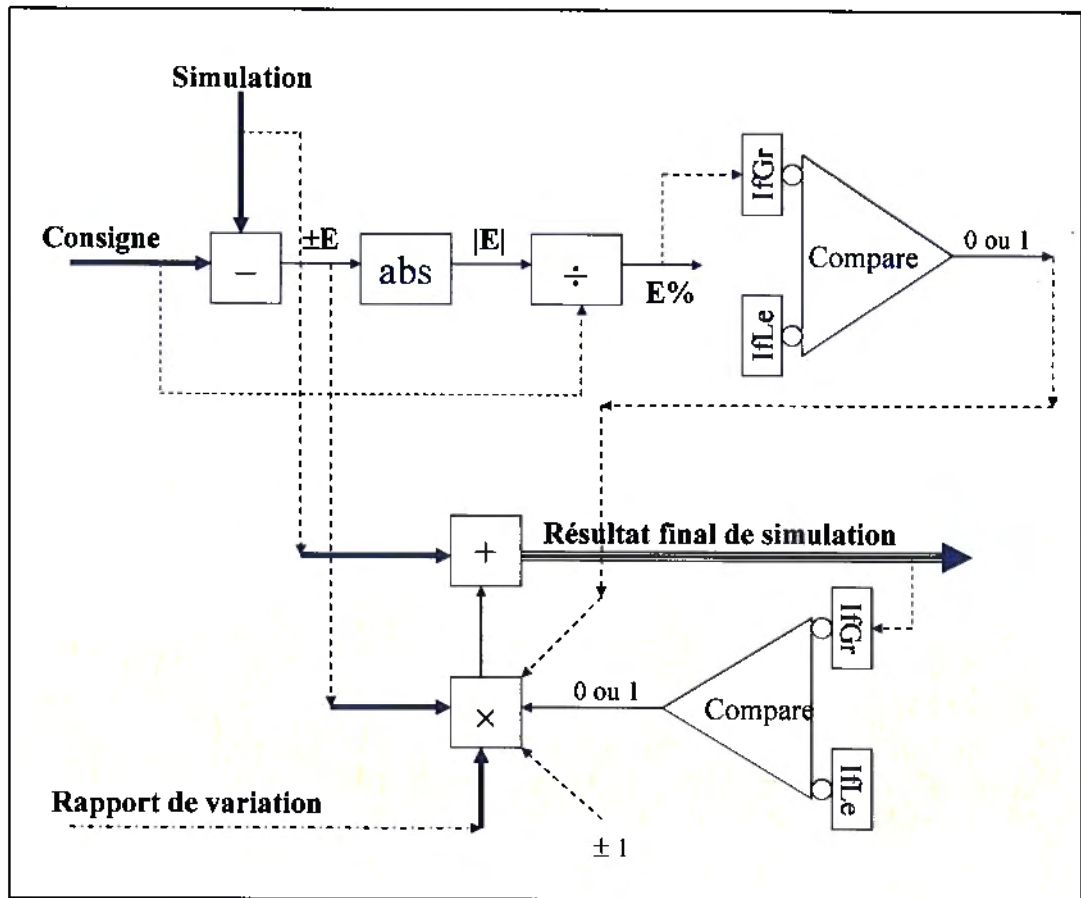


Figure 4.15 Jugement du sens de variation

Supposant que la consigne CSF_1 est de 400mL, les résultats simulés pour CSF_1, Charge_1 et Ent_1 sont respectivement de 380mL, 30kw et 0.6 mm. Selon la logique à la figure 4.15, une erreur E égale à $350 - 400 = -50$ est générée, qui devient $|E| = 50$. Le diviseur calcule le pourcentage d'erreur E% (déviations absolues de la consigne) comme étant $50 / 400 = 12.5\%$. Si cette erreur est acceptable (l'erreur désirée est mise par l'utilisateur sur le modèle Compare en haut, avec la spécification IfLe), le modèle de comparaison génère la valeur 0 pour indiquer que la valeur simulée de CSF_1 est acceptable et que le rapport de variation généré par le modèle R_P n'a pas à être utilisé. Si par contre le seuil d'erreur acceptable n'était que de 10%, le modèle de comparaison générerait la valeur 1 pour indiquer que le CSF_1 devra être ajusté avec le modèle R_P. Le modèle de Compare au dessous de la figure 4.15 est utilisé comme une contrainte de la sortie du résultat final de simulation. Si la sortie dépasse la limite de la base de

données, la sortie de Compare est zéro, et dans ce cas la valeur du résultat final égale la sortie du modèle direct (sans correction par le modèle R_P).

Assumant qu'une correction est nécessaire, puisque Charge_1 et CSF_1 varient en sens opposé, on multiplie la valeur corrigée par -1. Assumant que le modèle R_P génère un rapport de 10 pour ce groupe d'essai, alors la correction devient $-50 / 10 = -5$ et la valeur simulée de la Charge_1 devient $30 + (-5) = 25$ kw.

Finalement, un autre module de comparaison (figure 4.15) est utilisé pour déterminer si la valeur corrigée est dans les limites acceptables du procédé. Par exemple, si la limite maximale de charge est de 50kw et la limite minimale est de 27kw, la logique de comparaison ferait en sorte que la correction serait limitée à 27kw plutôt que 25.

La correction de Ent_1 s'effectue de la même façon : si le modèle R_P génère Charge_1 / Ent_1 = 20, la valeur simulée de l'Ent_1 finale sera de $0.6 + 5 / 20 = 0.85$ mm.

4.2.3 Modification de la base de données

Le modèle R_P est en fait un modèle qui n'a servi qu'à générer de nouvelles valeurs de la base de données dans le but de mieux répartir les points d'apprentissage dans un espace de dimension très élevée. De nouvelles valeurs corrigées sur Ent_1, Charge_1, CSF_1 etc., ont été ajoutées dans chacun groupe d'essais du stade 1, tout en s'assurant que les nouvelles valeurs ne dépassent pas les limites dans la base de données originale (tableau 4-3).

Tableau 4-3 Aperçu de la modification de la base de données pour le stade 1

IDBatch	CopeauxD	EP	PG	Humid	Dens	Lumin	Charge_1	Ent_1	Temp_1	Dil_1	CSF_1
2	A01	0	40	48.85	0.447	52.0	25	0.75	140	0.3	600.00
2	A01	0	40	48.85	0.447	52.0	28	0.65	140	0.3	505.00
2	A01	0	40	48.85	0.447	52.0	31.4	0.55	140	0.3	413.00
2	A01	0	40	48.85	0.447	52.0	32.6	0.5	140	0.3	360.00
3	A11	0	100	48.93	0.442	57.9	26.2	0.8	140	0.3	635.00
3	A11	0	100	48.93	0.442	57.9	28	0.7	140	0.3	620.00
3	A11	0	100	48.93	0.442	57.9	29.4	0.6	140	0.3	606.00
3	A11	0	100	48.93	0.442	57.9	32	0.5	140	0.3	550.00
4	A12	0	0	53.35	0.509	47.5	30.5	0.7	140	0.38	603.00
4	A12	0	0	53.35	0.509	47.5	33	0.6	140	0.38	510.00
4	A12	0	0	53.35	0.509	47.5	35	0.55	140	0.38	447.75
4	A12	0	0	53.35	0.509	47.5	36.5	0.5	140	0.38	390.00

En comparant le tableau 4-3 avec la base de données originale (tableau 3-1), on remarque que dans chaque groupe d'essais les variables Ent_1, Charge_1 et CSF_1 comportent maintenant des variations.

La figure 4.16 donne un exemple de l'ajout de 4 points pour Ent_2 de 0.6 à 3 mm dans le groupe d'essai 35 tels que générés par le modèle R_P.

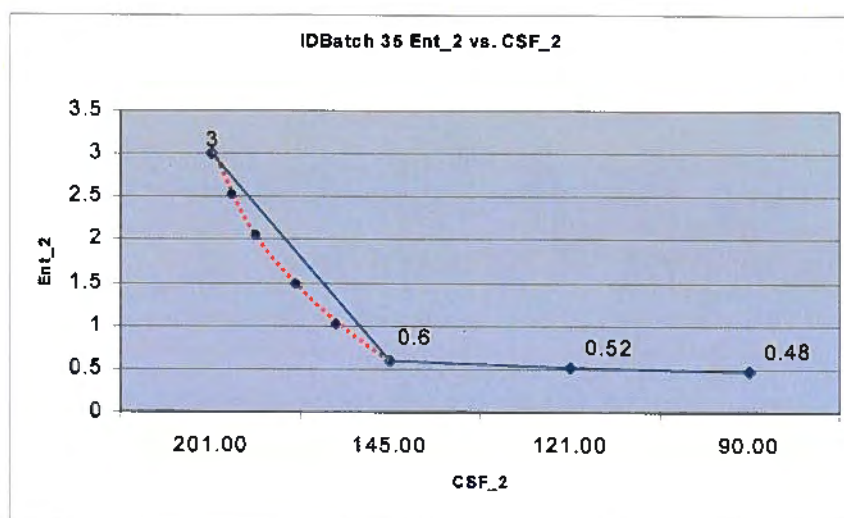


Figure 4.16 Expansion des données dans un groupe d'essais

4.3 Apprentissage et validation des modèles RDN

4.3.1 Validation avec la base de données modifiée

Pour confirmer la crédibilité du modèle de simulation, tous les modèles ont subi une étape rigoureuse de validation. Chaque modèle a en effet été validé avec trois groupes de données expérimentales demeurées « cachées ». Pour chaque groupe, 80% de la base de données a été sélectionnée aléatoirement pour faire l'apprentissage et le 20% des données restantes a été utilisé pour faire la validation.

La figure 4.17 présente les moyennes d'erreur de l'apprentissage et de la validation des sorties des modèles RDN. Les sorties des modèles *Stade_1* et *Stade_2* sont combinées dans cette figure. On voit que les erreurs sur l'apprentissage et la validation sont proches, alors on conclut que ces modèles peuvent être acceptés.

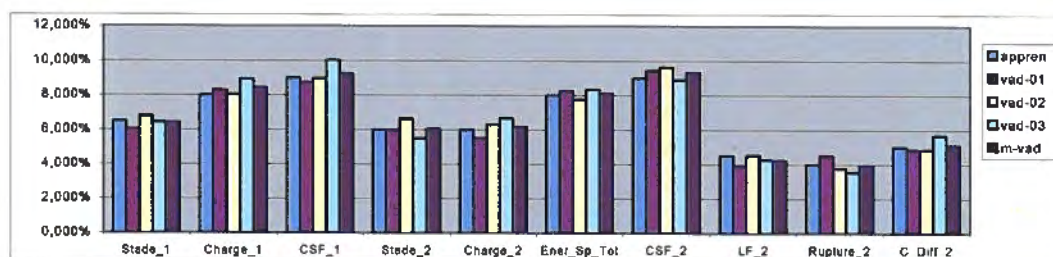


Figure 4.17 Apprentissage et validation des modèles RDN

où:

appren : erreur d'apprentissage des modèles;

vad-01-02-03 : erreur des trois validations du modèle

m-vad : moyenne d'erreur des trois validations

La figure 4.18 montre les erreurs sur chaque sortie lorsque 100% des données de la base de données sont utilisées.

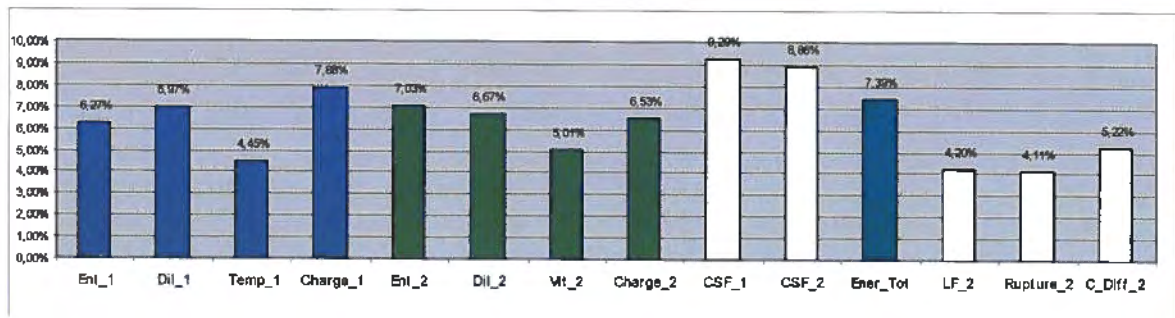


Figure 4.18 Erreurs finales des sorties des divers modèles

À noter que LF_1 n'apparaît pas dans cette figure puisque cette variable n'existe pas dans la base de données originale, on ne peut donc l'utiliser en validation.

4.3.2 Validation avec de nouvelles données expérimentales

Pour vérifier la capacité des divers RDN à reproduire des données jamais « vues », on a fait une nouvelle série d'essais en usine pilote pour obtenir 30 lignes de nouvelles données. La table 4-4 présente une partie de ces nouvelles données. On peut remarquer que les valeurs dans ce tableau ne correspondent à aucun essai (ou groupe d'essai) de la base de données.

Après avoir utilisé ces nouvelles données comme les variables d'entrée des modèles de deux stades de raffinement déjà présentés, la figure 4.19 montre les erreurs obtenues. La colonne bleue présente la moyenne de l'erreur de simulation des modèles originaux, la colonne rouge présente la moyenne de l'erreur de simulation du modèle original validé avec les 30 nouvelles données.

Tableau 4-4 Nouvelles données expérimentales

EP	SAP	PG	BOU	Dens	Lumin	H	S	L	Ent_2	Temp_1	Dil_1
50	25	25	0	0.398	55.88	21.886	110.94	49.7879	0.48	140	0.45
50	25	25	0	0.398	55.88	21.886	110.94	49.7879	0.42	140	0.45
50	25	25	0	0.398	55.88	21.886	110.94	49.7879	0.52	140	0.48
50	25	25	0	0.398	55.88	21.886	110.94	49.7879	0.42	140	0.48
25	25	0	50	0.44	55.88	21.891	110.99	48.7957	0.45	140	0.5
25	25	0	50	0.44	55.88	21.891	110.99	48.7957	0.40	140	0.5
25	25	0	50	0.44	55.88	21.891	110.99	48.7957	0.50	140	0.5
25	25	0	50	0.44	55.88	21.891	110.99	48.7957	0.42	140	0.5
25	25	25	25	0.42	55.88	21.89	110.97	49.3881	0.45	140	0.45
25	25	25	25	0.42	55.88	21.89	110.97	49.3881	0.40	140	0.45
25	25	25	25	0.42	55.88	21.89	110.97	49.3881	0.48	140	0.5
25	25	25	25	0.42	55.88	21.89	110.97	49.3881	0.42	140	0.5
70	0	15	15	0.419	55.88	21.905	111.07	48.7179	0.42	140	0.45
70	0	15	15	0.419	55.88	21.905	111.07	48.7179	0.38	140	0.45
70	0	15	15	0.419	55.88	21.905	111.07	48.7179	0.50	140	0.55
70	0	15	15	0.419	55.88	21.905	111.07	48.7179	0.42	140	0.55
35	35	0	30	0.395	55.88	21.921	111.13	48.7277	0.48	140	0.45

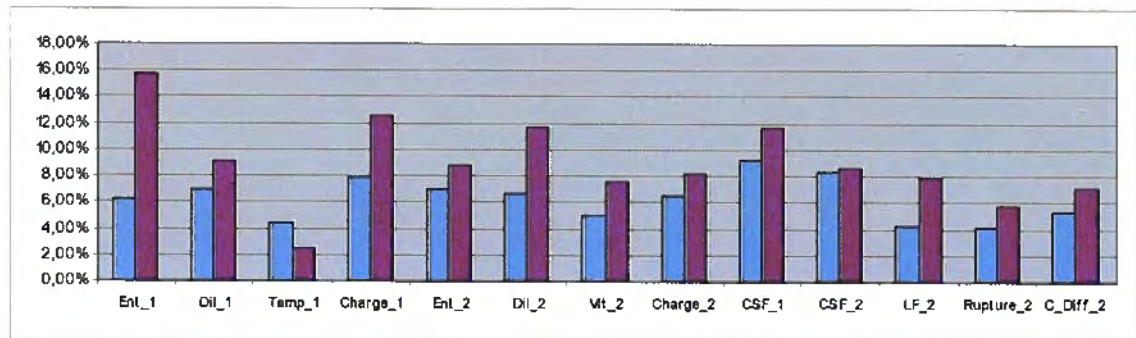


Figure 4.19 Validation des modèles avec 30 lignes de nouveaux essais

Ensuite on a sélectionné aléatoirement 24 lignes des nouvelles données et on les a ajouté dans la base de données originale pour refaire un apprentissage des modèles. Les 6 lignes restantes ont servi à faire la validation du modèle. La figure suivante montre le résultat des nouvelles erreurs obtenues. Les deux premières colonnes sont les mêmes que

la figure 4.19, la troisième présente la moyenne de l'erreur de simulation du modèle validé avec les 6 nouvelles lignes de données.

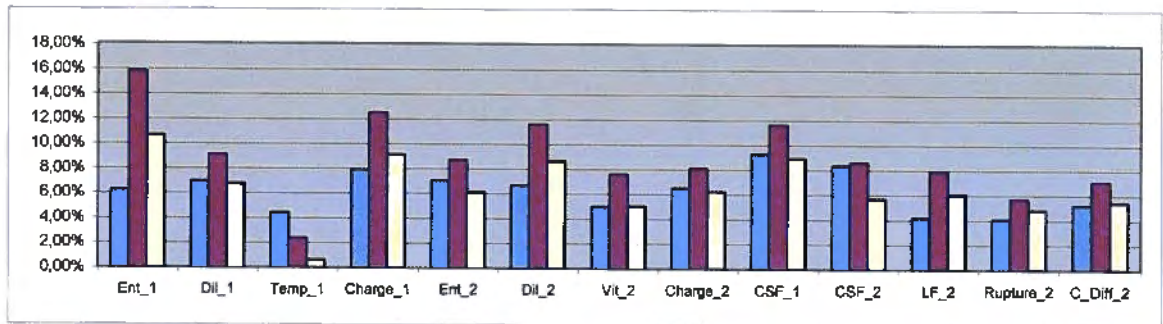


Figure 4.20 Validation avec les six lignes cachées

On remarque que l'erreur de simulation sur l'Ent_1 est toujours plus élevée que les autres. On remarque aussi que les nouvelles valeurs d'humidité des nouveaux copeaux des 30 essais dépassent les limites dans la base de données originale. Le résultat de l'analyse statistique (chapitre 3) montre qu'il y a une relation très significative entre l'humidité et l'entrefer, alors si l'humidité dépasse la limite de la base de données, cela peut affecter l'entrefer.

Une autre raison possible est qu'il n'y a pas assez de variation des propriétés de copeaux obtenue dans la base de données pour chaque entrefer utilisé. En effet, seulement 120 lignes comportent des combinaisons différentes de propriétés de copeaux et d'entrefer au premier stade.

Une troisième raison possible est que les 30 nouveaux essais ont été réalisés plusieurs mois après l'obtention de la base de données initiale, l'état des plaques du raffineur (usure) était peut-être différent.

4.4 Modèle de mélange des copeaux

Le modèle Papier (figure 4.10) permet de prédire les deux propriétés Rupture_2 et C_Diff_2. Un but de cette recherche est de concevoir une stratégie de contrôle qui permettrait le contrôle simultané de six consignes en même temps: CSF_1, LF_1, CSF_2, LF_2, Rupture_2 et C_Diff_2. Pendant l'opération, les quatre premières

variables peuvent être contrôlées par les variables manipulées du procédé, conformément à la pratique dans les usines (ajustement de l'entrefer, de la dilution et la charge de moteur, etc.). Par contre, pour des copeaux fixes, les propriétés mécaniques comme Rupture_2 et optiques comme C_Diff_2 peuvent parfois ne pas être atteintes, peu importe les paramètres d'opération du raffineur. Dans ce cas il faut peut-être manipuler le mélange des copeaux, par exemple augmenter le pourcentage d'épinette.

La table 4-5 montre les résultats de l'analyse multivariées entre les essences et les propriétés du papier.

Tableau 4-5 Relation entre l'essence du bois et les propriétés du papier

Rupture_2	EP	0,479378
	SAP	0,166399
	PG	-0,26451
	BOU	-0,84262
C_Diff_2	EP	-0,59606
	SAP	0,719985
	PG	-0,22552
	BOU	0,138684

On remarque qu'il existe une grande relation négative entre Rupture_2 et BOU, C_Diff_2 et EP; et une grande relation positive entre Rupture_2 et EP, C_Diff_2 et SAP. Pour une valeur donnée de Rupture_2, si on augmente BOU, alors EP doit être diminuée. Pour une valeur donnée de C_Diff_2, une augmentation de SAP doit s'accompagner d'une réduction de EP.

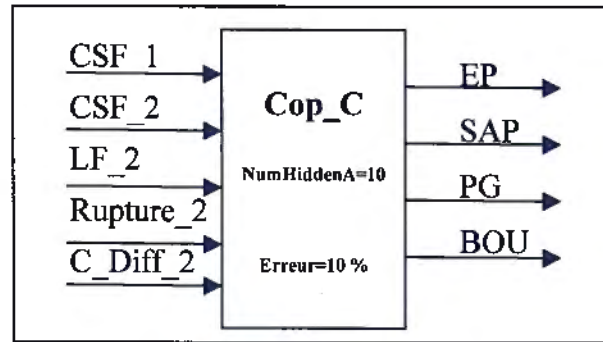


Figure 4.21 Modèle de mélange des copeaux

Basé sur ces relations, le modèle de mélange de copeaux Cop a été conçu (figure 4.21). Ce modèle utilise les cinq consignes en entrée, pour donner une estimation des proportions requises des quatre essences de bois (EP, SAP, PG et BOU). Encore ici ce modèle peut servir de base à un contrôleur par anticipation des propriétés du papier Rupture_2 et C_Diff_2, en anticipant les mélanges de copeaux requis.

À noter que la somme des quatre sorties du modèle Cop n'est peut-être pas égal à 100%. Un autre module est alors utilisé pour filtrer les pourcentages de sortie de sorte que leur somme soit effectivement égale à 100%. Ces valeurs du mélange sont ensuite envoyées aux modèles directs et inverses des stades 1 et 2 (figure 4.22).

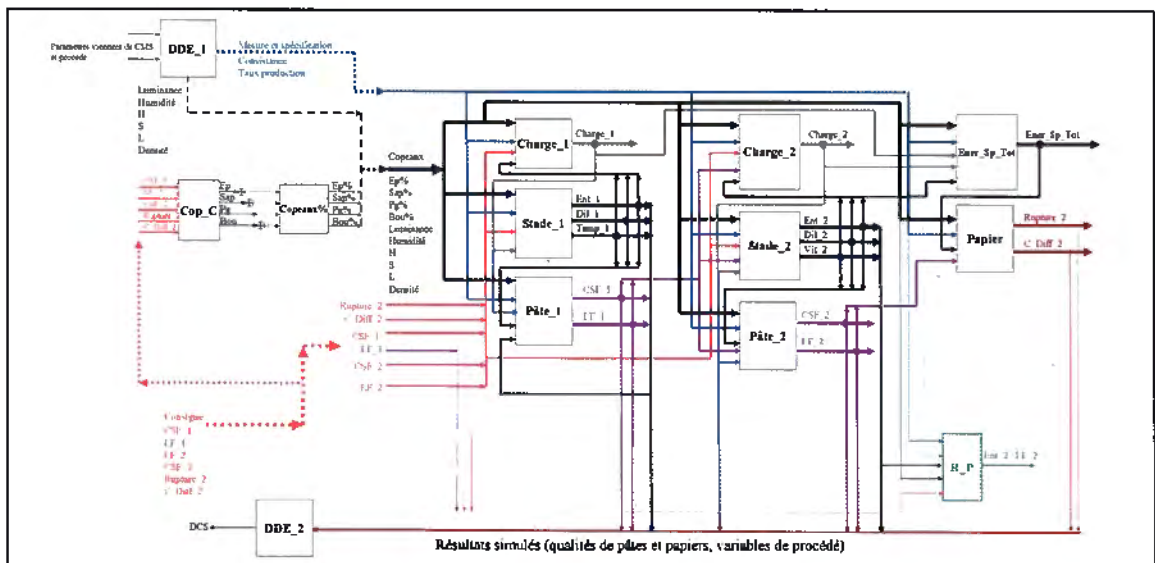


Figure 4.22 Structure finale de la modélisation statique

La figure 4.22 montre en fait la structure finale de la partie modélisation. Au départ, on commence par fixer les six consignes des pâtes et papiers (CSF_1, LF1, LF_2, CSF_2, Rupture_2 et C_Diff_2). Le modèle inverse de Cop génère une première estimation du mélange nécessaire à l'obtention de ces consignes (on aurait tout aussi bien pu fixer ce mélange manuellement ou le lire à partir du fichier Excel). Le modèle de DDE_1 injecte les variables de copeaux du fichier Excel (humidité, densité, luminance, H, S, L, etc.) vers la simulation et les modèles Charge_1, Stade_1, Pâte_1, Charge_2, Stade_2, Pâte_2, Ener_Sp_Tot et Papier sont exécutés. Le modèle DDE_2 transfère les résultats simulés de Cadsim Plus vers un autre fichier Excel pour enregistrer les résultats. Ce module pourrait également servir à envoyer les variables manipulées de la simulation (Ent_1, Dil_1, Temp_1, Ent_2, Dil_2, Vit_2) vers les nouvelles consignes du procédé au DCS des raffineurs.

Chapitre 5 Modèles dynamiques

Les divers modèles du chapitre 4 sont instantanés. Pour contrôler dynamiquement le procédé, on doit établir une simulation en y incluant les éléments dynamiques (temps de transport, mélanges, etc.). Dans ce chapitre nous allons décrire les modules permettant d'amener cette dimension dynamique à la simulation.

5.1 Le procédé PTM avec deux stades

La figure 5.1 présente le schéma du procédé PTM en deux stades sous la plate-forme du logiciel Cadsim Plus.

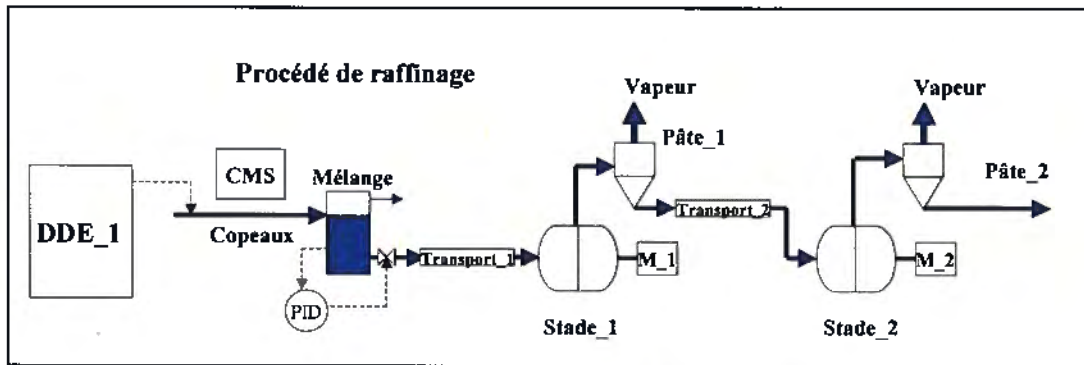


Figure 5.1 Le procédé de PTM en deux stades

Premièrement, toutes les variables permettant de réaliser les bilans de masse sont définies: eau, vapeur, fibre, ds_fr_wood (un nom spécial dans Cadsim Plus pour désigner la fibre perdue en solide dissous selon le rendement du raffineur). Certaines de ces variables sont à leur tour subdivisées en diverses composantes, comme par exemple la fibre qui est subdivisée en copeaux_EP, copeaux_SAP, copeaux_PG, copeaux_BOU, fibre_Longue, fibre_Médium, fibre_Fine et fibre_Rejet.

Ensuite, les variables permettant de réaliser les bilans d'énergie sont définies: température et pression. Finalement, les variables non massiques (ou propriétés) sont définies : humidité, luminance, H, S, L, densité. Ces composantes numériques (non massiques) sont en fait « rattachées » au débit de fibre total dans la simulation, ce qui permet de les traiter elles aussi comme des variables dynamiques. Par exemple, si des

copeaux_EP et copeaux_SAP de luminance différentes sont mélangés dans un cuvier, la luminance résultante du mélange à la sortie du cuvier aura un comportement dynamique.

5.1.1 Modèle DDE (Dynamic Data Exchange)

Ce modèle sert à importer les variables de la simulation à partir d'un fichier Excel. À chaque itération du logiciel, une ligne de données Excel est introduite dans la simulation. Ceci permet de «préprogrammer» des scénarios dans Excel en assignant diverses valeurs aux variables sur chaque ligne et de les exécuter dans Cadsim Plus sans avoir à arrêter la simulation pour changer ces valeurs.

Certaines conversions sont nécessaires et sont prises en compte par certaines fonctionnalités du logiciel au moment de la création du diagramme de flux. Par exemple les copeaux sont spécifiées en pourcentage dans le fichier Excel (EP%, SAP%, PG% et BOU%), alors que les valeurs dans les conduites de Cadsim Plus sont en débit massique. On doit donc utiliser $\text{copeaux_EP}(\text{Cadsim}) = \text{taux_production}(\text{Excel}) * \text{EP\%}(\text{Excel})$.

5.1.2 Modèle du mélangeur de copeaux

Un modèle de réservoir dynamique est utilisé pour simuler l'imprégnation et le mélange des copeaux. Chaque composante massique (M) est accumulée dans le réservoir comme la différence entre les entrées et les sorties :

$$\frac{dM_{\text{réservoir}}}{dt} = \sum \dot{M}_{\text{entrée}} - \sum \dot{M}_{\text{sortie}} \quad \text{Équation 5.1}$$

Le niveau de réservoir est géré par un contrôleur PI qui manipule le débit de sa valve de sortie. En usine pilote ce contrôle n'existe pas et l'opérateur varie manuellement le niveau selon le débit des copeaux qu'il y déverse. Pour les fins de ce travail cette différence n'a aucun effet sur les résultats.

5.1.3 Modèle de raffineur, stade 1

Cadsim Plus fait une différence entre un raffineur de copeaux et un raffineur de pâte. Puisque le stade 1 est un raffineur de copeaux, à l'entrée du stade 1, les composantes massiques fibre_Longue, fibre_Médium, fibre_Fine et fibre_Rejet sont à zéros, et à la sortie du stade 1, les composantes copeaux_EP, copeaux_SAP, copeaux_PG, copeaux_BOU sont à zéros.

Les valeurs massiques de fibre_Longue, fibre_Médium, fibre_Fine et fibre_Rejet qui résultent du raffinage des copeaux sont définies par les paramètres du raffineur de premier stade. En particulier, un raffineur de copeaux est configuré à l'aide d'une courbe de calibration exponentielle qui associe diverses fractions de fibres résultant d'une opération à diverses énergies spécifiques. Si plus d'énergie spécifique est appliquée, la réduction des fractions de fibre sera plus sévère, et vice-versa. La nature de cette variation est spécifique à chaque raffineur et elle doit être caractérisée dans chaque cas.

5.1.4 Modèle de raffineur, stade 2

Les composantes massiques de fractions de fibre à la sortie du stade_1 deviennent les composantes de l'entrée du stade 2. À leur tour, les valeurs des composantes de fibre_Longue, fibre_Médium, fibre_Fine et fibre_Rejet à la sortie du stade_2 sont définies par les paramètres de calibration du raffineur du stade 2.

Qu'il s'agisse d'un raffineur de copeaux ou de pâtes, les bilans d'énergie utilisés par le logiciel permettent d'évaluer la quantité de vapeur qui sera générée en sous produit à la sortie du raffineur.

En plus de l'énergie spécifique appliquée et des débits massiques de fibres (ou copeaux) à l'entrée, l'utilisateur doit également spécifier la quantité d'eau (dilution) qui entre au raffineur.

Finalement, dépendant du rendement spécifié pour le raffineur, une partie des fibres est convertie en une composante massique de types solides dissous qui se retrouve dans la

même conduite de sortie que la pâte. Une partie de ces solides peuvent à leur tour être redirigés vers la sortie de vapeur (volatiles), ce qui n'a pas été fait dans cette simulation, faute de données à cet effet.

5.1.5 Modèle de délai de transport

Ce modèle possède deux variables, `START_TIME` et `LAG_TIME`. Quand le temps de simulation équivalent à `START_TIME` est dépassé, ce modèle entre en jeu. Son rôle est de retarder les débits de son entrée durant un temps équivalent à `LAG_TIME` avant de les injecter à sa sortie, simulant ainsi un temps de transport des masses impliquées. La simulation utilise deux modules de délai : un pour le temps de transport entre le moment où les copeaux passent sous le CSM et arrivent à l'entrée du raffineur 1, et un autre pour simuler le temps de transport inter stade. Par exemple, supposant qu'en réalité pour transporter les copeaux du CMS vers l'entrée du premier raffineur, on a besoin de 20 secondes, on doit donc mettre 20 secondes sur la spécification du premier `Transport_lag`. Pour le second `Transport`, si le délai entre raffineur_1 et raffineur_2 est 10 secondes, alors on utilise 10 secondes sur la spécification du second `Transport_Lag`.

5.2 Réponses dynamiques

5.2.1 Variation des débits de copeaux

La figure 5.2 montre la réponse dynamique en boucle ouverte du procédé face un changement d'échelon du débit total de fibres à l'entrée du procédé, en changeant le taux de production de 0.39 à 0.42 kg/min. De haut en bas, les trois courbes montrent respectivement le débit total de fibres à l'entrée du primaire, le débit total de fibres à la sortie du primaire et le débit total de fibres à la sortie du secondaire.

Dans la figure 5.2 on voit qu'il y a des temps de décalage (θ_1 et θ_2) entre le mélangeur et le stade_1, et entre le stade_1 et le stade_2. Ces deux temps de décalage sont spécifiés par les deux modèles de `Transport`. Le rendement spécifié est de 98%. Après les stade_1 et stade_2, les débits de fibres perdues en solides dissous sont notés Δd_1 et Δd_2 , respectivement.

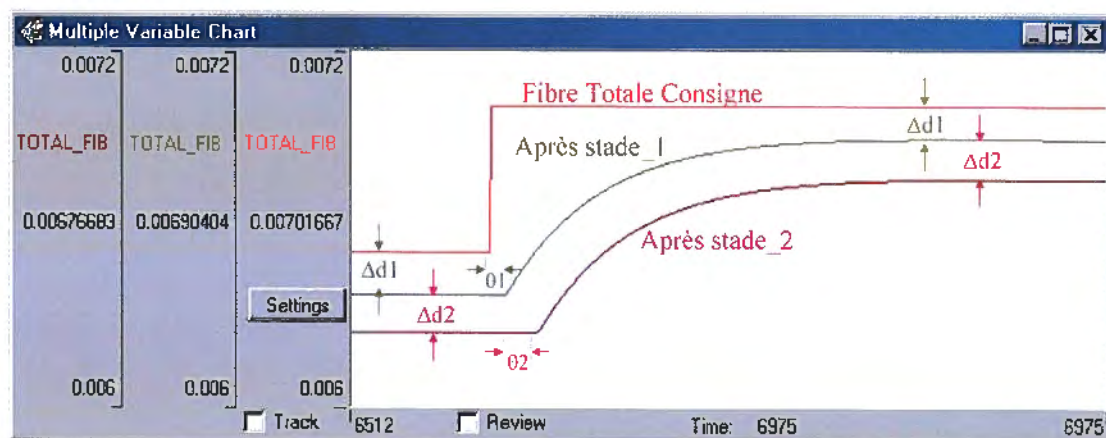


Figure 5.2 Réponse dynamique du procédé face à un changement d'échelon du débit total de fibres

5.2.2 Variation des propriétés des copeaux

Les caractéristiques des copeaux sont « rattachées » aux débits massiques des fibres. Ainsi, on peut ajouter une perturbation sur ces variables non massiques pour par exemple simuler des copeaux plus frais ou provenant d'un autre arrivage. Le résultat sera une réponse dynamique du changement de ces propriétés dans le procédé simulé. Le tableau 5-1 montre un exemple de variation dans les caractéristiques de copeaux et la figure 5.2 montre la réponse dynamique à la sortie du mélangeur.

Tableau 5-1 Changement des propriétés de copeaux entrant dans le procédé

	Lumin	H	S	L	Humid	Dens
Valeurs initiales	80.00	30.00	70.00	70.00	40.00	0.45
Nouvelles valeurs	51.30	21.70	103.40	51.30	49.23	0.38

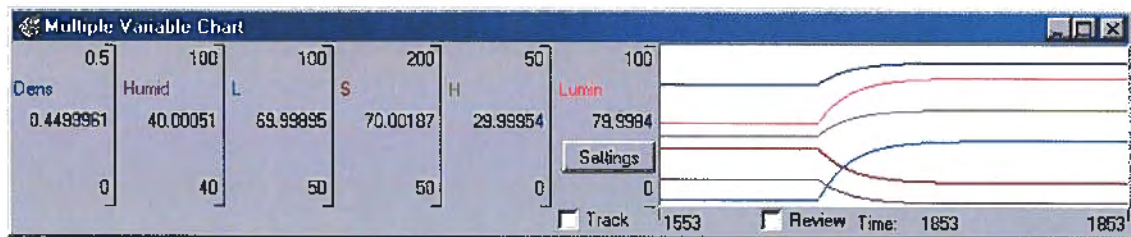


Figure 5.3 Réponses dynamiques des propriétés de copeaux à la sortie du mélangeur

5.3 Synchronisation des modèles dynamiques et RDN

La figure 5.4 sert à expliquer les liens entre les parties dynamiques et statiques. Les données des copeaux initiales passent par un mélangeur et un délai de transport avant le premier stade. Elles sont à ce point dirigées vers la partie statique pour alimenter les divers modèles RDN Charge_1, Stade_1 et Pâte_1 dans lesquels ces données apparaissent. La même logique s'applique au point d'injection entre les deux raffineurs, après le second délai de transport pour l'alimentation des modèles de Charge_2, Stade_2 et Pâte_2.

On peut aussi envoyer des variables des modèles statiques vers la partie dynamique, par exemple diviser la sortie du RDN Charge_1 par le taux de production et renvoyer cette valeur comme variable « énergie spécifique » du module de raffinage des copeaux (stade_1).

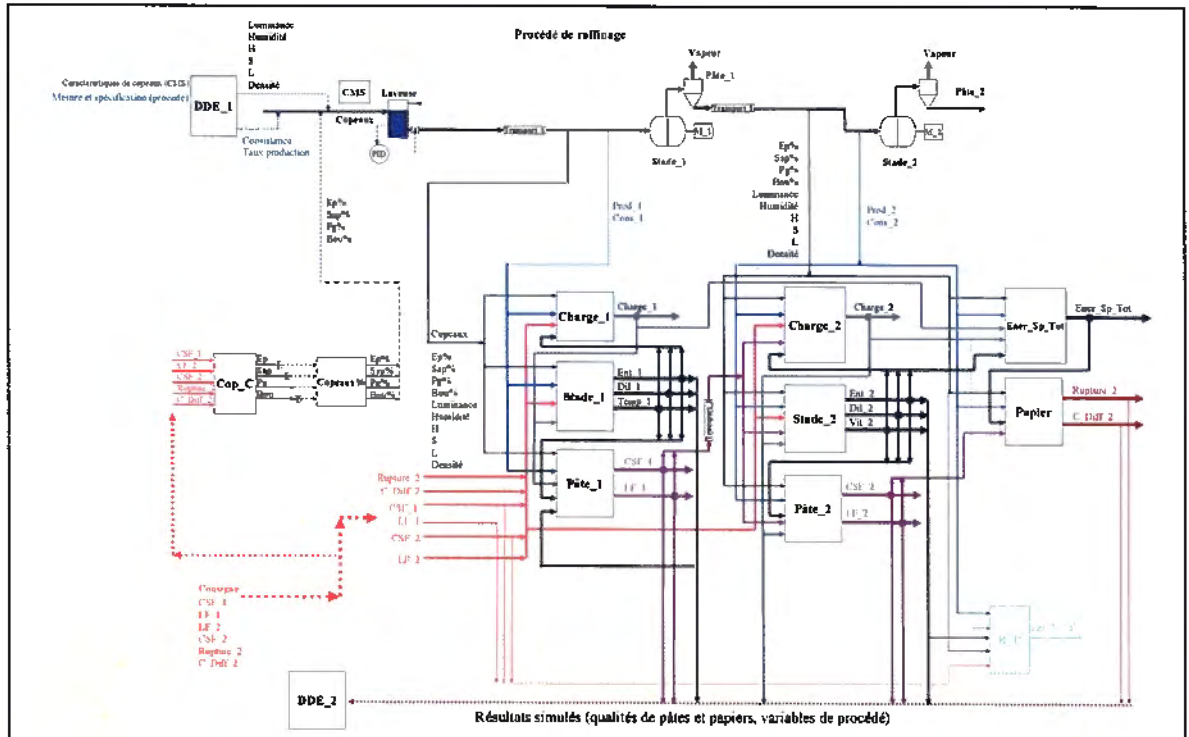


Figure 5.4 Liens entre les parties dynamiques et statiques

5.4 Réponses statiques et dynamiques

Cette section présente un exemple des réponses en boucle ouverte de chaque RDN pour des perturbations de consignes, de mélanges et de propriétés. On peut se référer au chapitre 3 pour expliquer les sens de la variation des réponses.

5.4.1 Changement des consignes (réponses statiques)

Les figures suivantes présentent les réponses statiques de chaque RDN face à des changements de consigne des propriétés des pâtes et papiers. Les réponses sont statiques car les consignes ne sont pas encore liées à leurs contrôleurs (chapitre 6). Le tableau 5-2 montre les valeurs initiales des propriétés de copeaux et des consignes. Les figures suivantes présentent les réponses suite au changement des valeurs de consigne.

Tableau 5-2 Variables utilisées pour examiner les réponses dynamiques des modèles

EP	SAP	PG	BOU	Lumin	H	S	L	Humid	Dens	CSF_1	CSF_2	LF_2	Rupture 2	C Diff 2
1.00	0.00	0.00	0.00	51.30	21.70	103.40	51.30	49.23	0.38	580.00	160.00	1.90	42.00	56.00

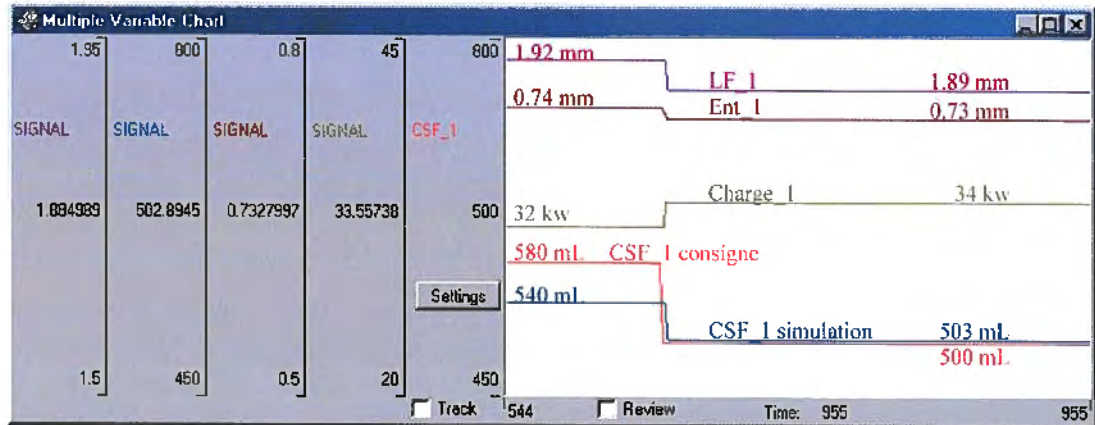


Figure 5.5 Réponses statiques face au changement de la consigne CSF_1

La figure 5.5 montre les réponses statiques sur les modèles du premier stade. On voit qu'après avoir diminué le CSF_1 de 580 à 500 mL, Charge_1 augmente, Ent_1 et LF_1 diminuent, et CSF_1 calculé est de 503 mL. On remarque aussi que initialement l'erreur entre la consigne (580mL) et la simulation du CSF_1(540 mL) est grande, en l'absence d'un contrôleur.

La figure 5.6 montre les réponses des modèles du second stade. On observe que le changement de la consigne de CSF_2 (de 160 à 140 mL) fait augmenter Charge_2, diminuer Ent_2 et LF_2. La valeur prédite du CSF_2 simulé passe de 155 à 147 mL.

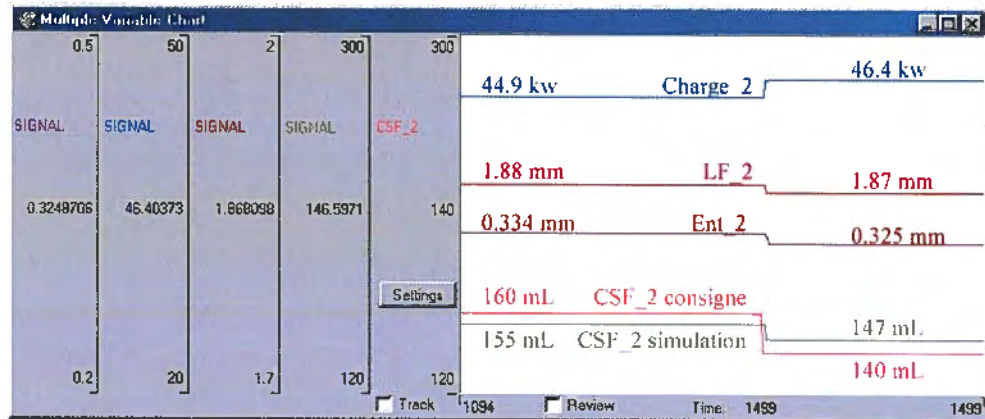


Figure 5.6 Réponses statiques face à un changement de la consigne CSF_2

Réduire la consigne de LF_2 (de 1.85 à 1.80 mm) fait augmenter un peu la Charge_2, diminuer un peu de Ent_2 et CSF_2. Dans ce cas particulier il ne semble qu'il n'y a pas de variation sur LF_2 simulée (figure 5.7). En effet la relation entre LF_2 (une des sorties du modèle de Pâte_2) et Ent_2 (une des entrées du modèle de Pâte_2) est très faible (chapitre 3). Lorsque Ent_2 simulé ne change pas beaucoup comme ici, cela n'affecte pas le résultat simulé de LF_2.

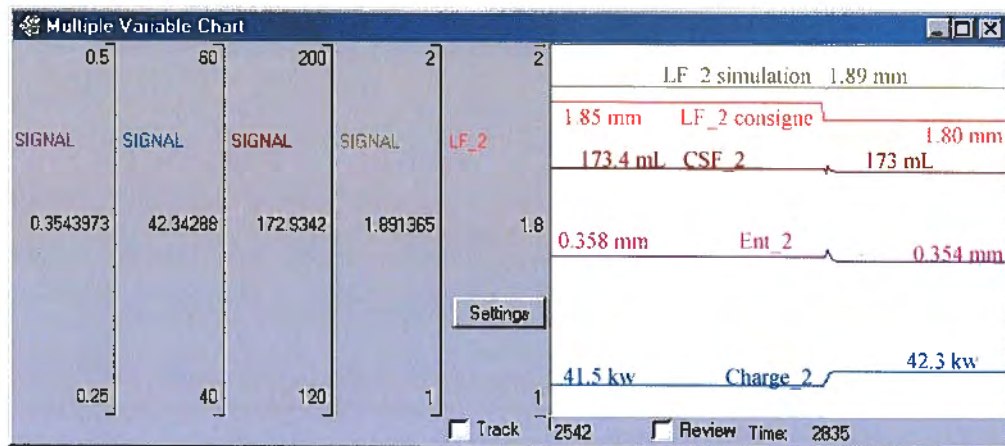


Figure 5.7 Réponses statiques face au changement de la consigne LF_2

Finalement, on présente les réponses face à des changements des consignes de qualité du papier Rupture_2 et C_Diff_2 (figures 5.8 et 5.9).

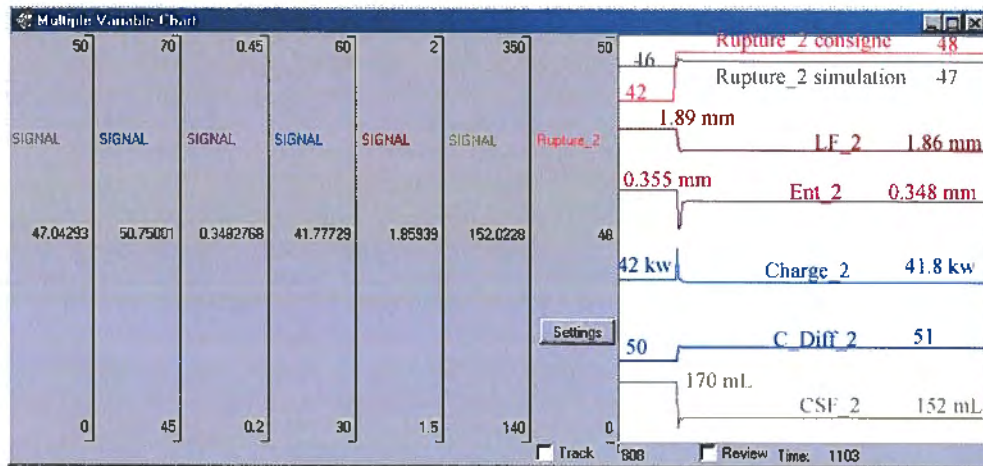


Figure 5.8 Réponses statiques face au changement de la consigne Rupture_2

On trouve que l'augmentation de Rupture_2 (de 42 à 48) fait diminuer Ent_2. En théorie, la Charge_2 devrait être augmentée, mais ici elle ne change pratiquement pas, probablement à cause de l'erreur intrinsèque de ce modèle RDN. On remarque aussi une perturbation sur la réponse de Ent_2 et de la charge_2, laquelle est causée par une interaction avec CSF_1 et LF_1. En effet, en examinant le diagramme de la figure 5.4, on peut voir qu'un changement de consigne de Rupture_2 affecte les valeurs de CSF_1 et LF_1 qui à leur tour affectent les valeurs de charge_2 et Ent_2. Il s'agit là d'un exemple des conséquences du cycle décrit à la figure 4.4. Il ne faut pas traiter ces perturbations comme des valeurs réelles ou représentatives des sorties des RDN mais plutôt comme des valeurs temporaires et sans signification de l'engin de résolution de Cadsim Plus lorsqu'il fait face à des cycles dans la simulation. Ces perturbations pourraient en fait être éliminées par un filtre.

Quoi qu'il en soit, pour augmenter l'indice de rupture, on doit dépenser plus d'énergie, alors Ent_2 doit être réduit, LF_2 et CSF_2 s'en trouvent diminués et cela fait également augmenter C_Diff_2. On peut remarquer que toutes ces tendances sont reproduites à la figure 5.8.

Dans la figure 5.9, on montre les réponses face à une réduction de la consigne de C_Diff_2 (de 56 à 50). Il y a donc moins de développement des fibres et moins

d'énergie. On remarque effectivement une réduction de la Charge_2 et une augmentation de Ent_2, qui à leur tour font diminuer Rupture_2.

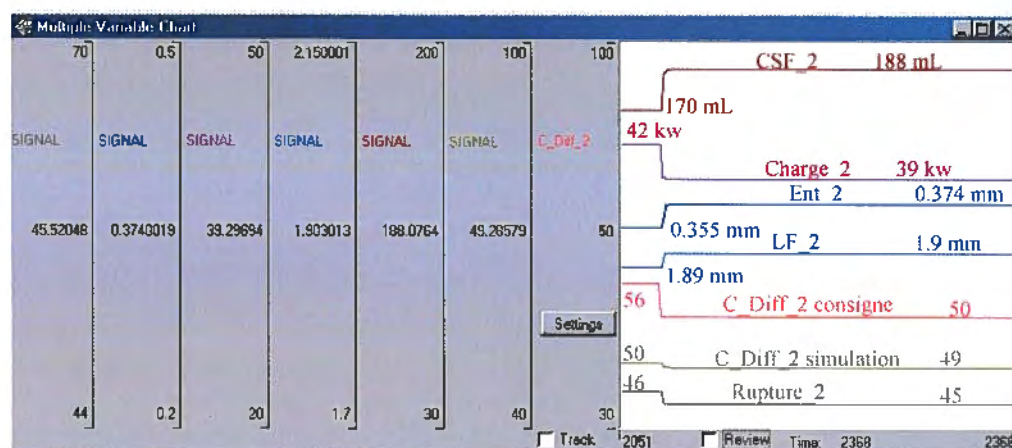


Figure 5.9 Réponses statiques face au changement de la consigne C_Diff_2

5.4.2 Changement des caractéristiques de copeaux (réponses dynamiques)

En pratique on fait souvent face à la situation où les caractéristiques de copeaux (Lumin, H, S, L, Humid, Dens) varient alors que les consignes et les composantes d'essence du bois sont maintenues constantes. Les figures de 5.10 à 5.13 présentent une série d'exemples de cette situation. Bien sûr, en perturbant les propriétés de copeaux, il existe peut-être plusieurs combinaisons des variables manipulées du procédé pour garder la qualité de pâte dans les limites de consigne. Le modèle développé peut seulement sélectionner une combinaison parmi elles.

La figure 5.10 montre les réponses dynamiques lorsque Lumin varie de 41 à 51, pour simuler un arrivage de copeaux plus frais. On remarque que l'augmentation de la luminance cause une réduction de la Charge_1. Des copeaux plus frais, donc des fibres plus flexibles, demandent moins d'énergie au premier stade pour atteindre les mêmes propriétés de pâtes. Par exemple, pour maintenir LF_1, on a besoin d'une augmentation de Ent_1, ce qui fait diminuer la Charge_1. Mais ici on constate que Ent_1 est presque fixe, parce que la réduction de LF_1 ne dépasse pas la limite minimale. Dans ce cas

seule Dil_1 augmente pour contrebalancer la relation entre Charge_1 et Ent_1. Au stade_2, on voit que la réduction du CSF_2 est limitée par une augmentation de Dil_2 (cela fait réduire la consistance et le temps de séjour et alors les fibres sont moins développées [37]). Le modèle comporte aussi les deux propriétés de papier Rupture_2 et C_Diff_2, lesquelles peuvent être affectées significativement par Lumin. De plus, pour maintenir les propriétés finales après le stade 2, comme l'énergie spécifique totale doit demeurer constante, la diminution de la Charge_1 s'accompagne d'une augmentation de la Charge_2.

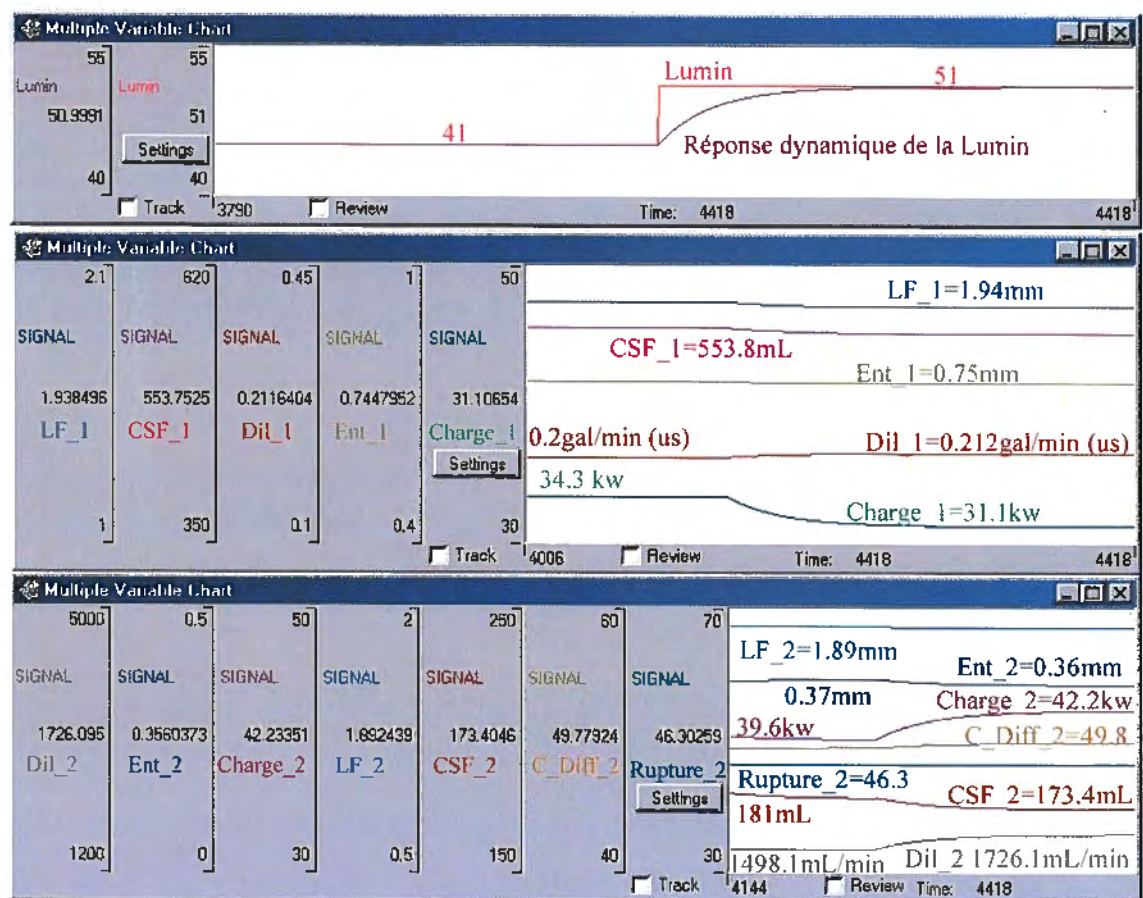


Figure 5.10 Réponses dynamiques face à un changement de la luminance

La figure 5.11 présente les réponses après avoir diminué l'Humidité de 50 à 40. La masse des fibres diminue, la consistance de pâte est ainsi augmentée, la force centrifuge est réduite, donc le temps de séjour est augmenté [8]. Il en résulte une diminution de

CSF_1 et CSF_2, avec un petit ajustement de Charge_1, Ent_2 et Dil_2. Ent_1 et LF_1 réduisent un peu, tout comme Ent_2. Il semble que la variation de Humid n'affecte pas significativement les deux qualités de papier Rupture_2 et C_Diff_2.

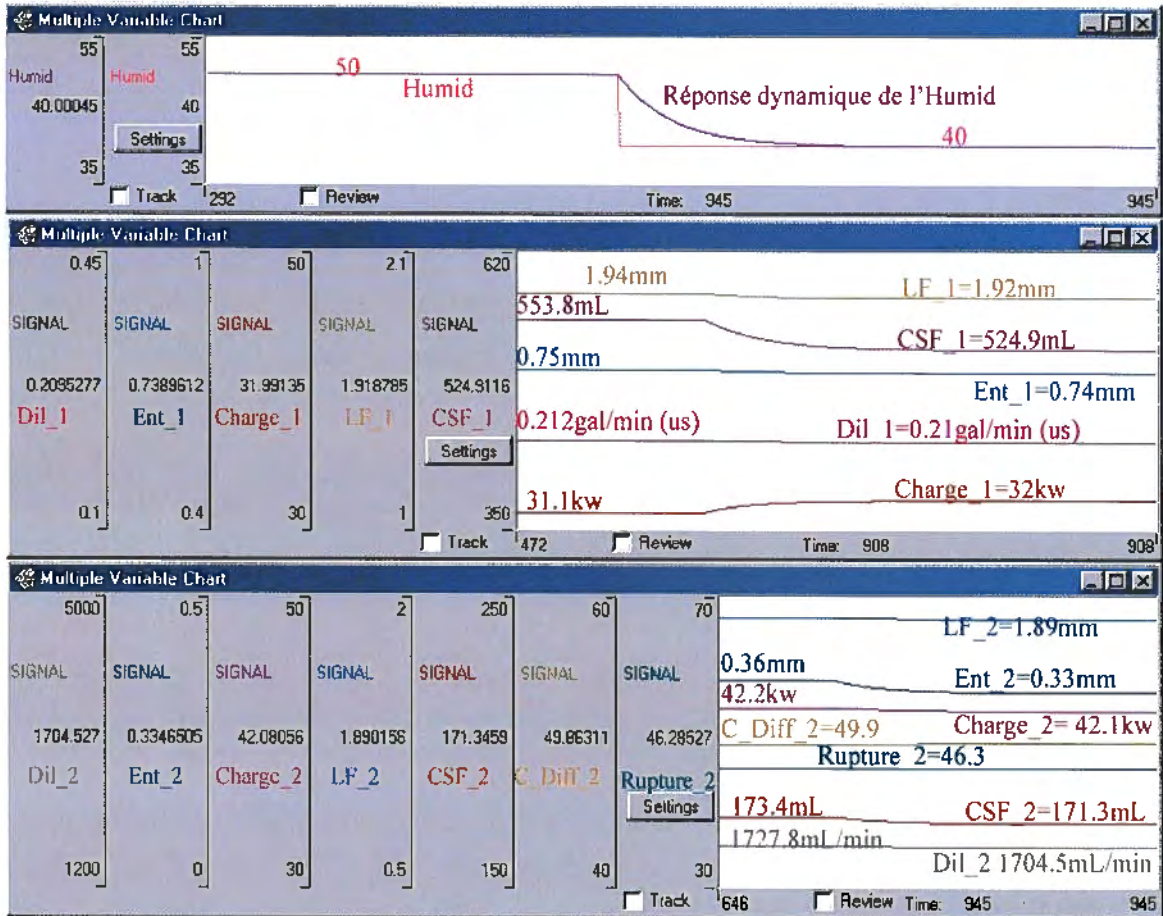


Figure 5.11 Réponses dynamiques face à un changement de l'humidité

À la figure 5.12, on voit que l'augmentation de la densité (de 0.38 à 0.45) peut affecter presque toutes les variables, sauf C_Diff_2. Une densité plus élevée signifie des fibres plus dures et plus courtes. Pour écraser les copeaux plus durs et maintenir le développement des fibres, il faut donc augmenter la Charge_1 ou diminuer la Dil_1 (augmenter le temps de séjour). Pour contrebalancer la réduction du CSF_2 et de la longueur de fibre qui en résulte, il faut aussi diminuer la Charge_2 (Ent_2 augmente). Cette réduction de Charge_2 fait réduire la Rupture_2.

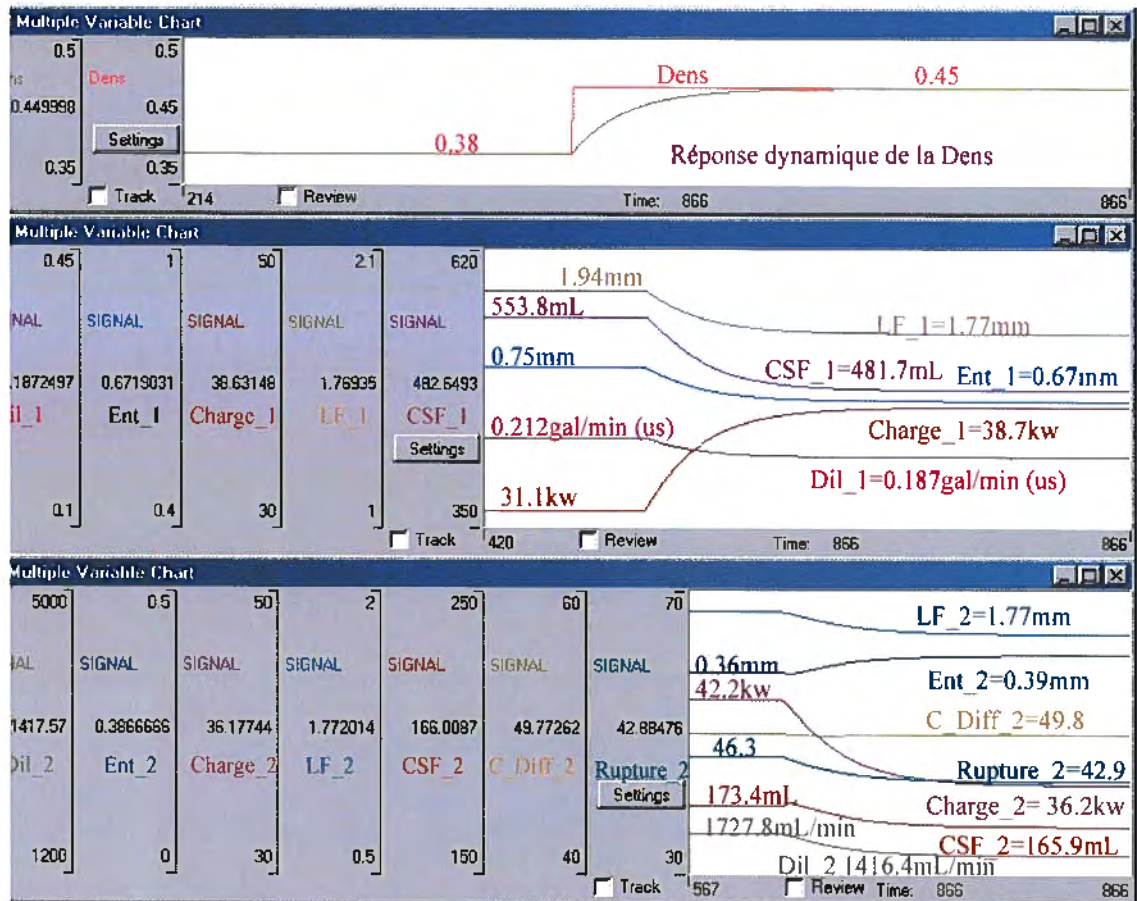


Figure 5.12 Réponses dynamiques face à un changement de la densité

Finalement, on discute des réponses face à des variations des essences, en particulier une diminution de la composante de EP% (100% à 80%). La réduction de l'EP fait baisser CSF_1 et LF_1. Comme les résultats analytiques du chapitre 3 le montrent, il existe une relation positive entre EP, LF_2, CSF_2 et Rupture_2. En conséquence, ces trois variables diminuent. La relation est par contre négative entre EP et C_Diff_2, donc C_Diff_2 augmente. Pour maintenir les autres consignes malgré la réduction de CSF_2 et LF_2, la Charge_2 diminue.

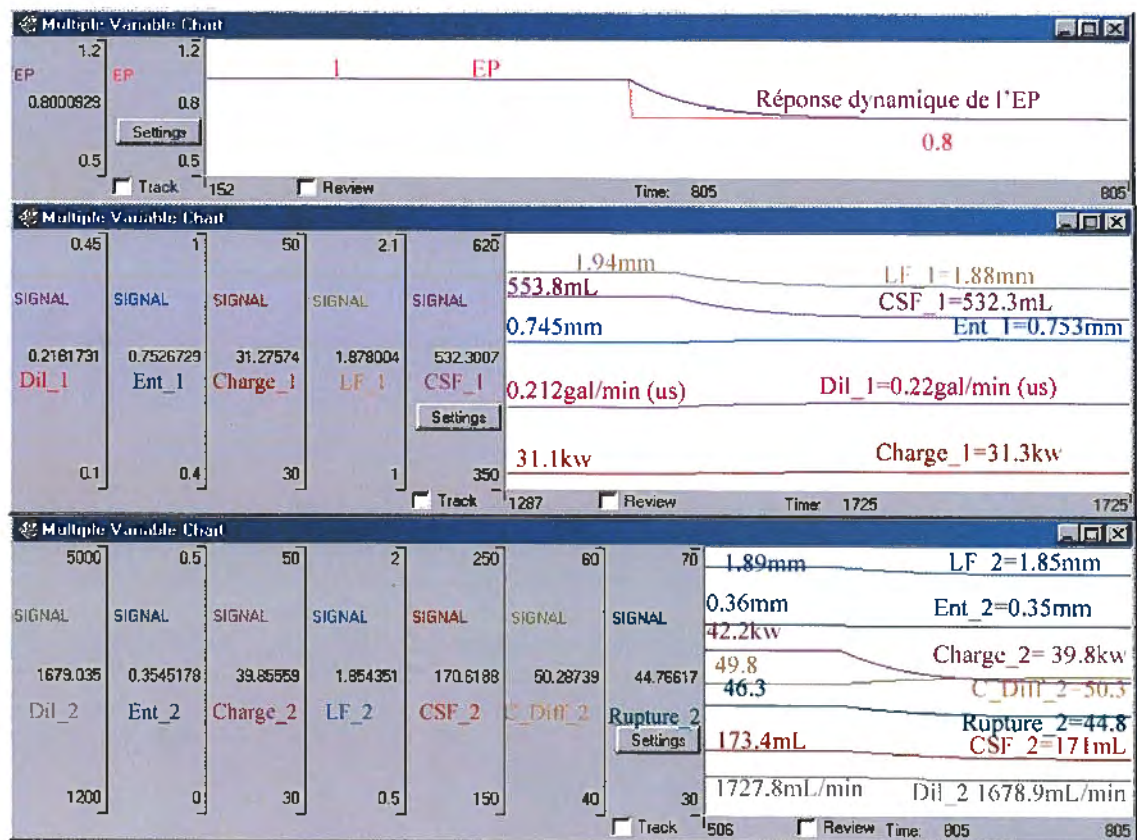


Figure 5.13 Réponses dynamiques face à un changement de l'EP

Chapitre 6 Contrôle du procédé

Ce chapitre présente la conception des contrôleurs par anticipation (CA) utilisés pour le contrôle de CSF_1, LF_1, CSF_2 et LF2, considérant la dynamique du procédé présentée au chapitre 5. Les résultats démontrent qu'on réussit à bien contrôler les consignes de propriétés de pâtes désirées. Les cas où on ne réussit pas à les contrôler seront aussi présentés, par exemple lorsque les consignes sont en dehors du domaine modélisé par les RDN. Les contrôleurs de mélange de copeaux, qui servent au contrôle des deux autres propriétés Rupture_2 et C_Diff_2, seront présentés au chapitre suivant.

6.1 Contrôle par anticipation du CSF_1 et LF_1

6.1.1 Principe général de fonctionnement

La figure 6.1 présente le schéma général des contrôleurs de CSF_1 et LF_1 tels qu'ils apparaissent dans la simulation. La figure 6.2 montre le diagramme du contrôle par anticipation qui en résulte. Pendant la simulation, à partir des données de copeaux, des consignes et des variables de production, les valeurs de Charge_1 et Ent_1 sont premièrement générées en exécutant le modèle direct Charge_1 et le modèle inverse Stade_1 (rappelons l'interaction qui a lieu entre ces deux modèles avant d'arriver à un état d'équilibre). Le modèle direct de Pâte_1 est ensuite exécuté pour générer les propriétés CSF_1 et LF_1. Si l'erreur de simulation sur ces sorties dépasse la limite désirée, alors les contrôleurs de CSF_1 et LF_1 entrent en jeu et manipulent les valeurs de Charge_1, respectivement Ent_1, dans la limite des contraintes physiques imposées par le procédé.

6.1.2 Ajout de contraintes

Le contrôleur possède deux limites sur sa consigne, la consigne supérieure et la consigne inférieure, lesquelles sont décidées par l'utilisateur (figure 6.2). Par exemple, on peut vouloir produire des pâtes de $CSF_1 = 450 \pm 10$ mL, c'est à dire qu'une variation de 2.2% peut être acceptée sur le CSF_1 visé. Pendant la simulation, si la variable mesurée

est entre ces deux limites, alors il n'y aura pas d'action de contrôle générée par le contrôleur de CSF_1.

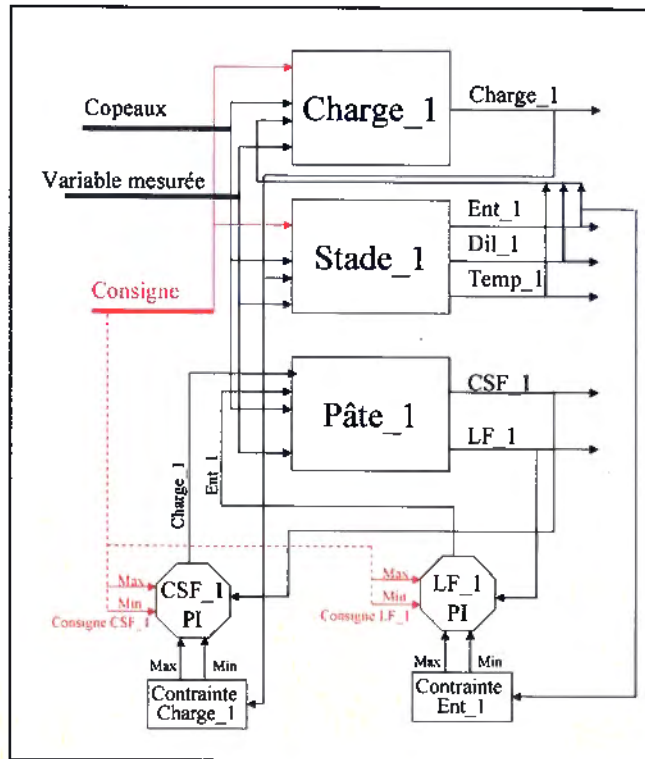


Figure 6.1 Schéma de simulation des contrôleurs de CSF_1 et LF_1

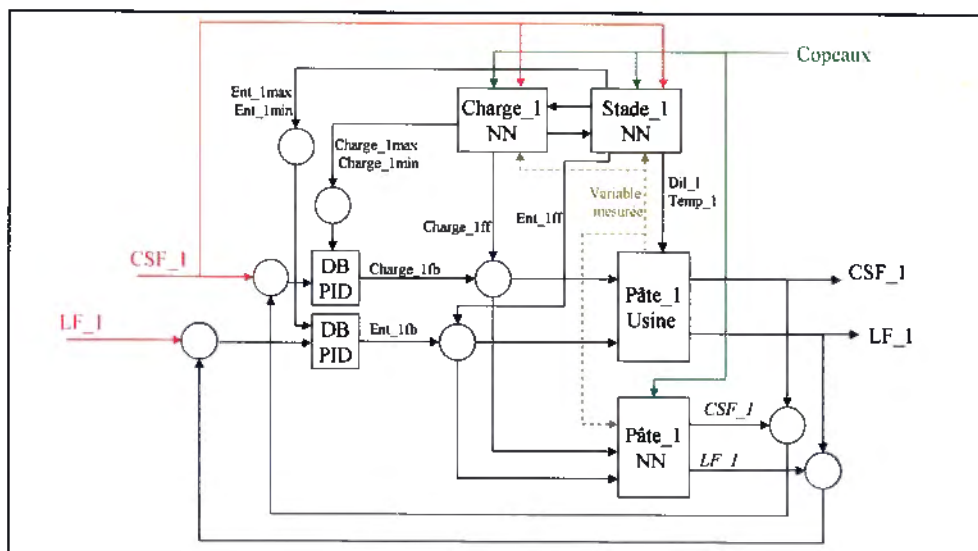


Figure 6.2 Diagramme des contrôleurs par anticipation de CSF_1 et LF_1

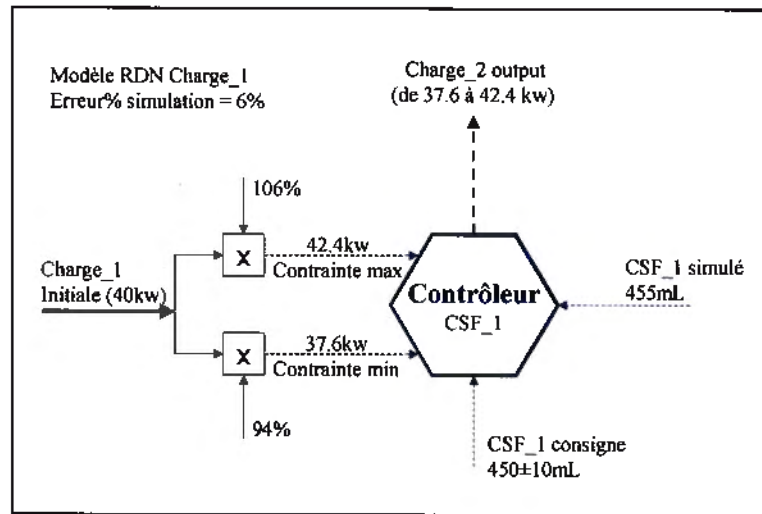


Figure 6.3 Contraintes sur les variables anticipées manipulées.

Pour des raisons de sécurité, les contrôleurs sont aussi contraints par les valeurs maximales et minimales des variables manipulées Charge_1 en Ent_1. Par exemple, une grande variation de certaines propriétés de copeaux peut générer une grande réaction sur la charge. Également, une consigne trop basse ou trop haute sur le CSF_1 peut engendrer des actions de contrôles hors des valeurs de sécurité, d'où l'utilisation de ces contraintes.

Dans cette recherche, puisque les modèles inverses sont tirés d'un plan d'expérience dont les valeurs sont forcément à l'intérieur des limites du procédé desquelles elles ont été obtenues, on contraint la sortie du contrôleur avec la variable manipulée anticipée dans une zone correspondant à l'erreur de simulation du modèle RDN. Par exemple, si la charge_1 initiale générée par le modèle de Charge_1 est 40 kw, et que l'erreur de simulation de ce modèle est 6%, alors les contraintes de Charge_1 seront de 37.6 kw et 42.4 kw.

6.2 Contrôle par anticipation du CSF_2 et LF_2

Les figures 6.4 et 6.5 présentent la structure des contrôleurs du CSF_2 et LF_2. Le principe est le même que pour CSF_1 et LF_1, à deux différences près: il y a un modèle

R_P à la sortie du contrôle de LF_2; les entrées du Stade_2 incluent les sorties du modèle de Pâte_1, soient LF_1 et CSF_1.

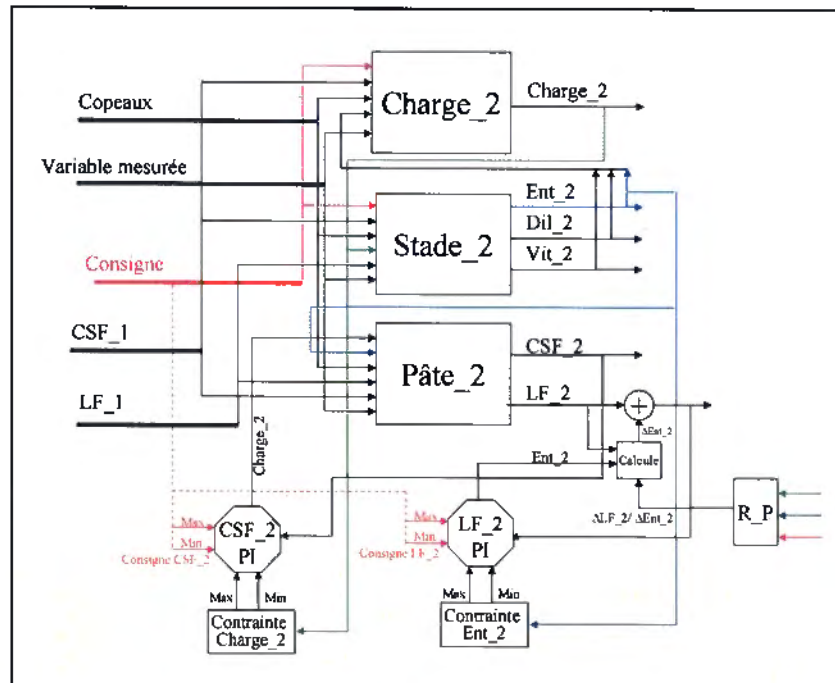


Figure 6.4 Schéma de simulation des contrôleurs du second stade

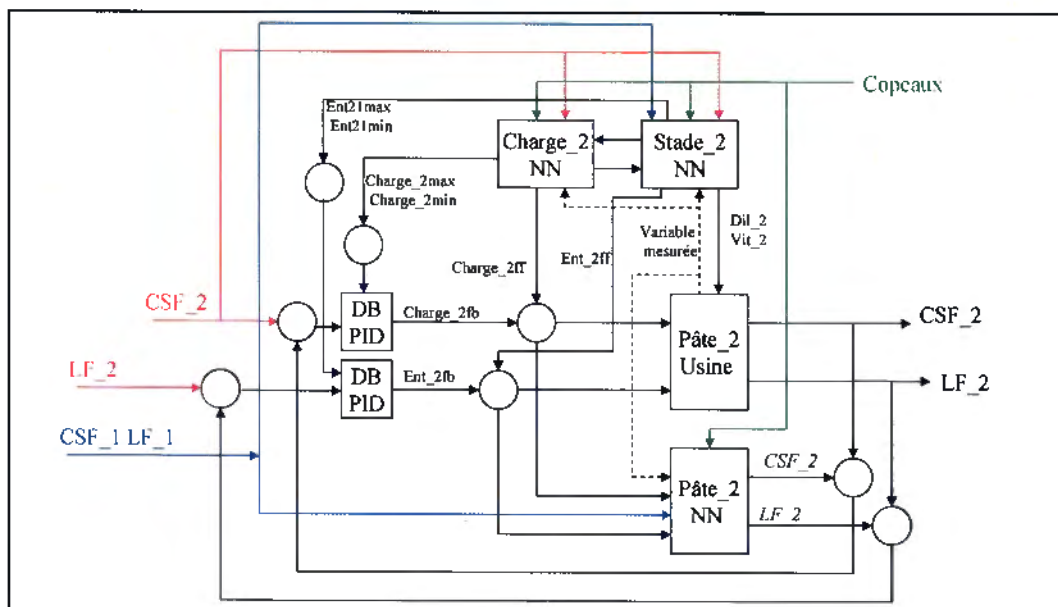


Figure 6.5 Diagramme des contrôleurs par anticipation du second stade

6.2.1 Modèle R_P de LF_2

Les analyses du chapitre 3 montrent qu'il existe une relation assez faible entre LF_2 et Ent_2 si on prend toute la base de données dans son ensemble. Par contre, si on étudie cette relation dans un seul groupe d'essai, cette relation devient très significative. On a donc encore ici besoin d'un régulateur proportionnel pour combler les « vides » du domaine expérimental pour ces 2 variables.

Pour construire ce modèle de R_P, le rapport entre ΔEnt_2 et ΔLF_2 a premièrement été calculé pour chaque groupe d'essai dans la base de données. Rappelons que dans un groupe d'essai, $\Delta\text{Ent}_2 = \text{Ent}_{2\text{max}} - \text{Ent}_{2\text{min}}$, $\Delta\text{LF}_2 = \text{LF}_{2\text{max}} - \text{LF}_{2\text{min}}$. Puis, on a analysé statistiquement les relation entre les valeurs $\Delta\text{Ent}_2 / \Delta\text{LF}_2$ et les autres variables de la base de données (figure 6.6). Basé sur ces résultats analytiques, on a choisi les entrées du RDN et établi un modèle de R_P (figure 6.7).

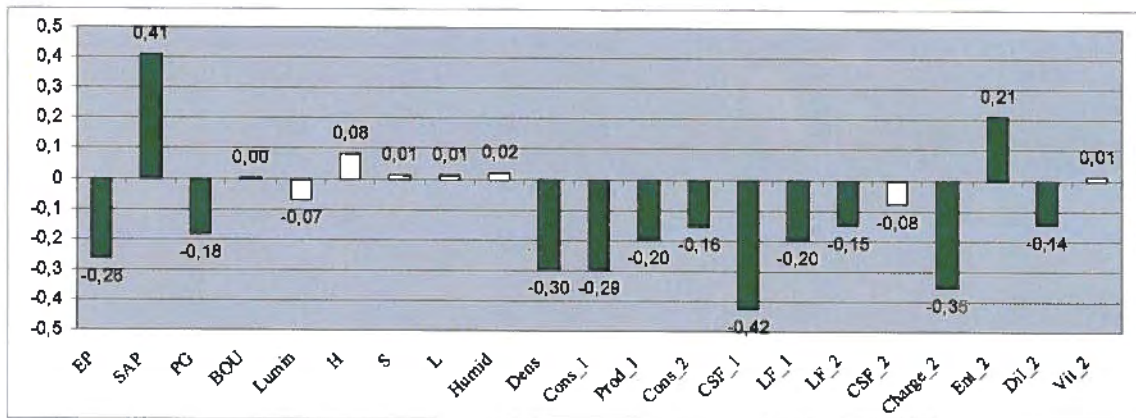


Figure 6.6 Relation entre $\Delta\text{Ent}_2 / \Delta\text{LF}_2$ et les autres variables de la BD

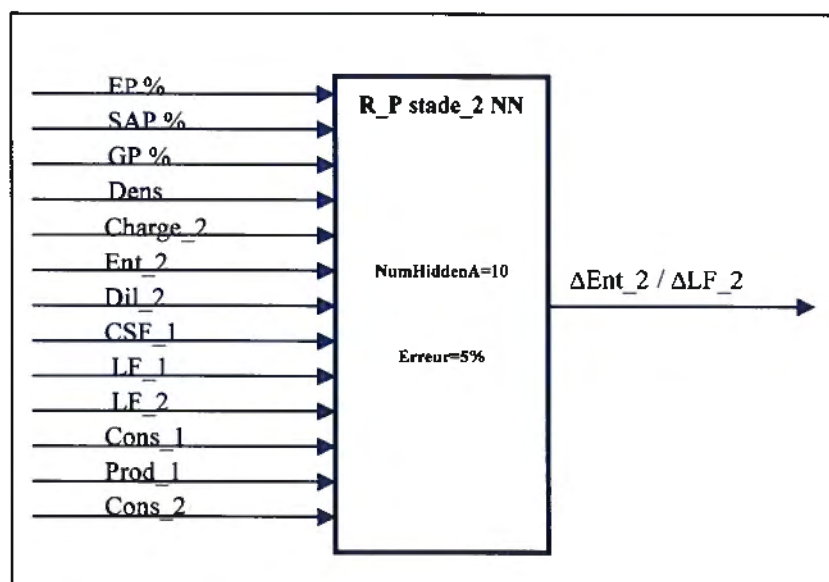


Figure 6.7 Modèle de R_P pour prédire $\Delta\text{Ent}_2 / \Delta\text{LF}_2$

Le modèle de R_P amène donc une correction sur la prédiction de la valeur de LF_2 à la sortie du modèle Pâte_2, qui résulte d'une action du contrôleur sur l'Ent_2 (figure 6.8). Le tableau 6-1 montre une partie des données utilisées pour faire l'apprentissage du RDN de R_P.

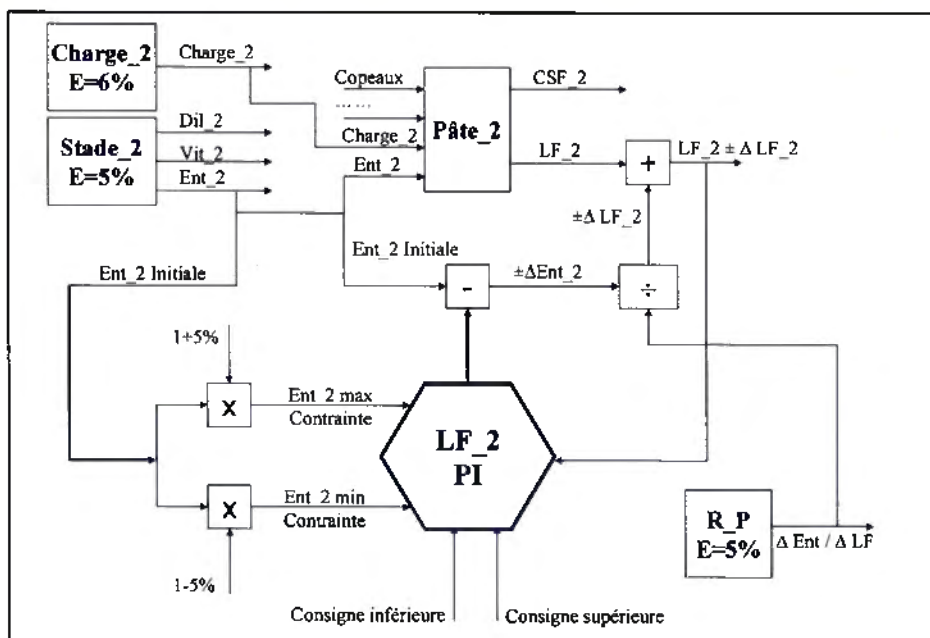


Figure 6.8 Contrôleur de LF_2 avec régulateur proportionnel

Tableau 6-1 Données pour l'apprentissage du modèle de R_P

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	inEP	inSAP	inPG	inDens	inCons_1	inProd_1	inCons_2	inCSF_1	inLF_1	inLF_2	inCharge_2	inEnt_2	inDil_2	outEntILF
2	0	0.2	0.4	0.45	24.64	0.548	11.84	413.00	1.31	1.30	40	0.5	1516	0.90497738
3	0	0.2	0.4	0.45	24.64	0.548	13	413.00	1.31	1.23	48	0.45	1516	0.90497738
4	0	0.2	0.4	0.45	24.64	0.548	12.84	413.00	1.31	1.22	50	0.42	1516	0.90497738
5	0	0.2	0.4	0.45	24.64	0.548	12.7	413.00	1.31	1.19	52	0.4	1516	0.90497738
6	0	0	1	0.44	29.12	0.632	11.62	606.00	1.77	1.76	32	0.5	1819	0.60836502
7	0	0	1	0.44	29.12	0.632	10.44	606.00	1.77	1.69	38	0.48	1819	0.60836502
8	0	0	1	0.44	29.12	0.632	12.74	606.00	1.77	1.68	42	0.45	1819	0.60836502
9	0	0	1	0.44	29.12	0.632	12.8	606.00	1.77	1.63	48	0.42	1819	0.60836502
10	0	0	0	0.51	27.62	0.635	14.12	447.75	0.85	0.84	50	0.38	1971	0.35714286
11	0	0	0	0.51	27.62	0.635	14.68	447.75	0.85	0.81	54	0.35	1971	0.35714286
12	0	0	0	0.51	27.62	0.635	13.54	447.75	0.85	0.77	54	0.32	1971	0.35714286
13	0	0	0	0.51	27.62	0.635	15.62	447.75	0.85	0.62	64	0.3	1971	0.35714286
14	1	0	0	0.38	22.09	0.391	11.42	582.75	2.01	2.00	38	0.48	1688	0.62305296
15	1	0	0	0.38	22.09	0.391	12.08	582.75	2.01	1.93	44	0.42	1688	0.62305296
16	1	0	0	0.38	22.09	0.391	12.08	582.75	2.01	1.91	46	0.4	1688	0.62305296
17	1	0	0	0.38	22.09	0.391	13	582.75	2.01	1.83	56	0.38	1688	0.62305296
18	0	1	0	0.33	20.58	0.507	9.72	465.50	1.64	1.63	24	0.8	1516	2.37037037
19	0	1	0	0.33	20.58	0.507	10.28	465.50	1.64	1.62	32	0.55	1516	2.37037037
20	0	1	0	0.33	20.58	0.507	10.44	465.50	1.64	1.60	36	0.5	1516	2.37037037
21	0	1	0	0.33	20.58	0.507	13.54	465.50	1.64	1.50	44	0.48	1516	2.37037037
22	0.6	0	0	0.43	20.02	0.473	11.32	566.75	1.52	1.51	37	0.48	1706	0.5734767
23	0.6	0	0	0.43	20.02	0.473	10.94	566.75	1.52	1.46	40	0.45	1706	0.5734767
24	0.6	0	0	0.43	20.02	0.473	12.14	566.75	1.52	1.45	48	0.42	1706	0.5734767
25	0.6	0	0	0.43	20.02	0.473	12.38	566.75	1.52	1.37	63	0.4	1706	0.5734767

6.3 Réponses en boucle ouverte

Les paramètres du contrôleur PID sont montrés à la figure 6.9:

- Setpoint (consigne)
- Controller_Gain (Gain de contrôleur)
- Reset_Time (Constante de temps)
- Derivative_time (Constante de prédiction dérivative)
- Min_output, Max_output (pour limiter la variable manipulée)
- Max_control_change (pour limiter l'amplitude de la variation sur la variable manipulée)
- Initial_output, valeur initiale de la variable manipulée.

The screenshot shows a dialog box titled 'LEV CONTROL' with a close button (X) in the top right corner. It contains two columns: 'Specified' and '= Constant'. The parameters and their values are as follows:

Specified	= Constant
SETPOINT	1
CONTROLLER_GAIN	-0.01
RESET_TIME	50
DERIVATIVE_TIME	0
MIN_OUTPUT	0
MAX_OUTPUT	0.02
MAX_CONTROL_CHANGE	0.02
INITIAL_OUTPUT	0

At the bottom, there are three buttons: 'OK' (with a checkmark icon), 'Cancel' (with an 'X' icon), and 'Help' (with a question mark icon).

Figure 6.9 Paramètres d'un contrôleur PID

La calibration des contrôleurs s'est faite avec la méthode Lambda à partir de « bump tests » (annexe 1). Le gain de procédé K_p et la constante de temps τ ont premièrement été obtenus avec un « bump tests » en une boucle ouverte (Figure 6.10). La méthode Lambda a ensuite été appliquée pour trouver une valeur adéquate de gain du contrôleur K_c .

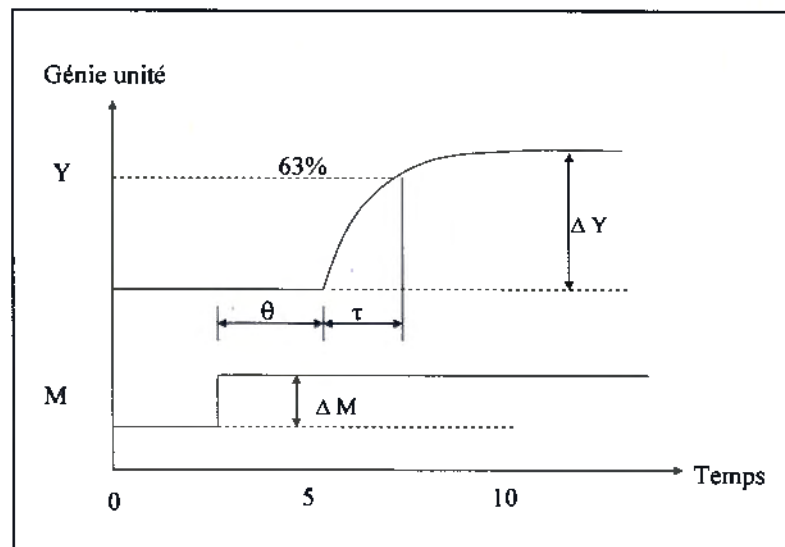


Figure 6.10 Utilisation d'un « bump test » sur un système du premier ordre

$$K_p = \Delta Y / \Delta M$$

Équation 6.1

où:

ΔM : l'augmentation de la sortie du contrôleur (la variable manipulée);

ΔY : l'augmentation de la sortie du modèle direct (la variable mesurée);

Pour le contrôle des raffineurs dont il est question dans ce chapitre, on néglige le délai θ et on assume que les actions sur la charge et l'entrefer sont instantanées. On verra au chapitre suivant que le contrôle des mélanges de copeaux, pour atteindre Rupture_2 et C_Diff_2, devra pour sa part prendre en compte le délai de transport des copeaux vers les raffineurs.

À cause des variations des composantes d'essence du bois et caractéristiques de copeaux, les K_p pour chaque groupe d'essai de la base de données sont différents (voir par exemple le tableau 6-1). Ceci implique que les valeurs de λ et K_c devraient être différentes dans chaque groupes d'essai. On pourrait donc construire un modèle comme le R_P pour générer automatiquement les valeurs de λ et K_c basé sur l'état des copeaux. Dans cette recherche, on les calcule et on les entre dans la simulation manuellement (figure 6.9).

Les sections suivantes présentent la calibration Lambda des 4 contrôleurs avec des copeaux 100% d'épinette. Les autres variables sont présentées au tableau 6-2. L'expérience recommande d'utiliser $2\tau < \lambda < 4\tau$. Si la valeur λ est trop petite, le contrôleur peut être instable, et si elle trop grande, la réponse est lente. On choisit donc ici $\lambda = 3\tau$ [6]. Le résultat de τ / λ utilisé dans les équations sera donc toujours égal à 0.333, ce qui évite d'avoir à mesurer la constante de temps τ .

Tableau 6-2 Entrées initiales des modèles

inEP	nSAP	inPG	inBOU	inLumin	inH	inS	inL	inHumid	inDens	inCons_1	inProd_1	Cons_2
1	0	0	0	51.3	21.7	103.4	51.3	49.23	0.38	29.09	0.391	12.100

6.3.1 Calibration du contrôleur de CSF_1

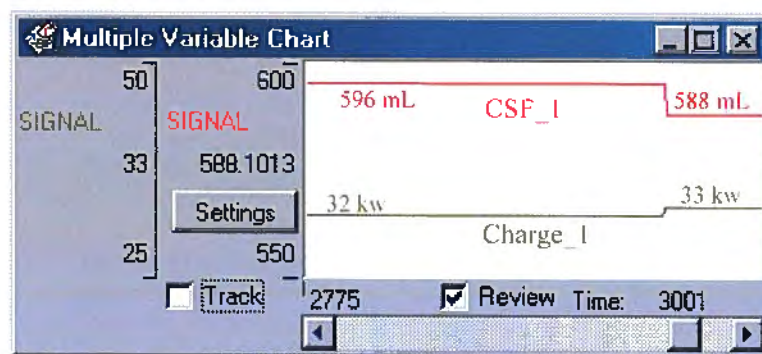


Figure 6.11 Échelon du contrôleur CSF_1

$$K_p = (596 - 588) / (32 - 33) = -8$$

$$K_c = (1 / -8) * (1 / 3) = -0.042$$

6.3.2 Calibration du contrôleur de LF_1

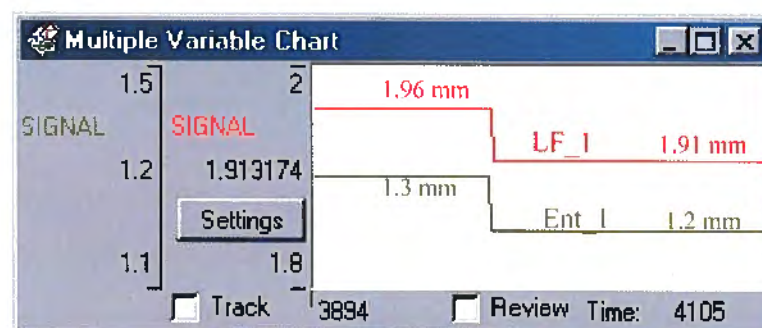


Figure 6.12 Échelon du contrôleur LF_1

$$K_p = (1.96 - 1.91) / (1.3 - 1.2) = 0.5$$

$$K_c = (1 / 0.5) * (1 / 3) = 0.667$$

6.3.3 Calibration du contrôleur de CSF_2

$$K_p = (158 - 164) / (43 - 42) = -6$$

$$K_c = (1 / -6) * (1 / 3) = -0.056$$

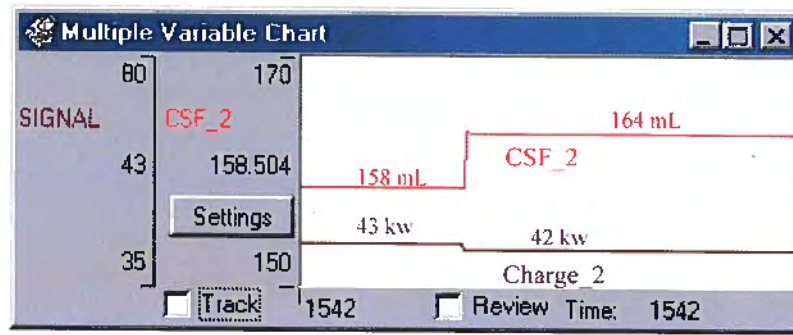


Figure 6.13 Échelon du contrôleur CSF_2

6.3.4 Calibration du contrôleur de LF_2

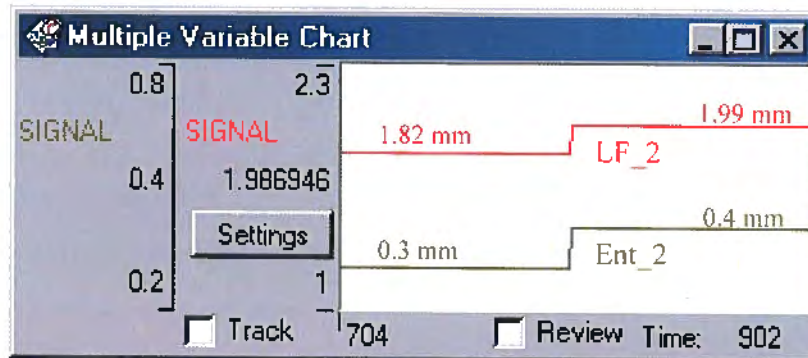


Figure 6.14 Échelon du contrôleur LF_2

$$K_p = (1.99 - 1.82) / (0.4 - 0.3) = 1.7$$

$$K_c = (1 / 1.7) * (1 / 3) = 0.2$$

6.4 Réponses en boucle fermée

Cette section présente la réponse dynamique en boucle fermée des CA suite à des changements de consignes ou à des perturbations sur les propriétés de copeaux.

6.4.1 Changements de consigne

6.4.1.1 Réponses à des changements séquentiels

Les figures suivantes montrent les réponses dynamiques de chaque contrôleur lesquelles incluent trois courbes : consigne, réponse et action de contrôle.

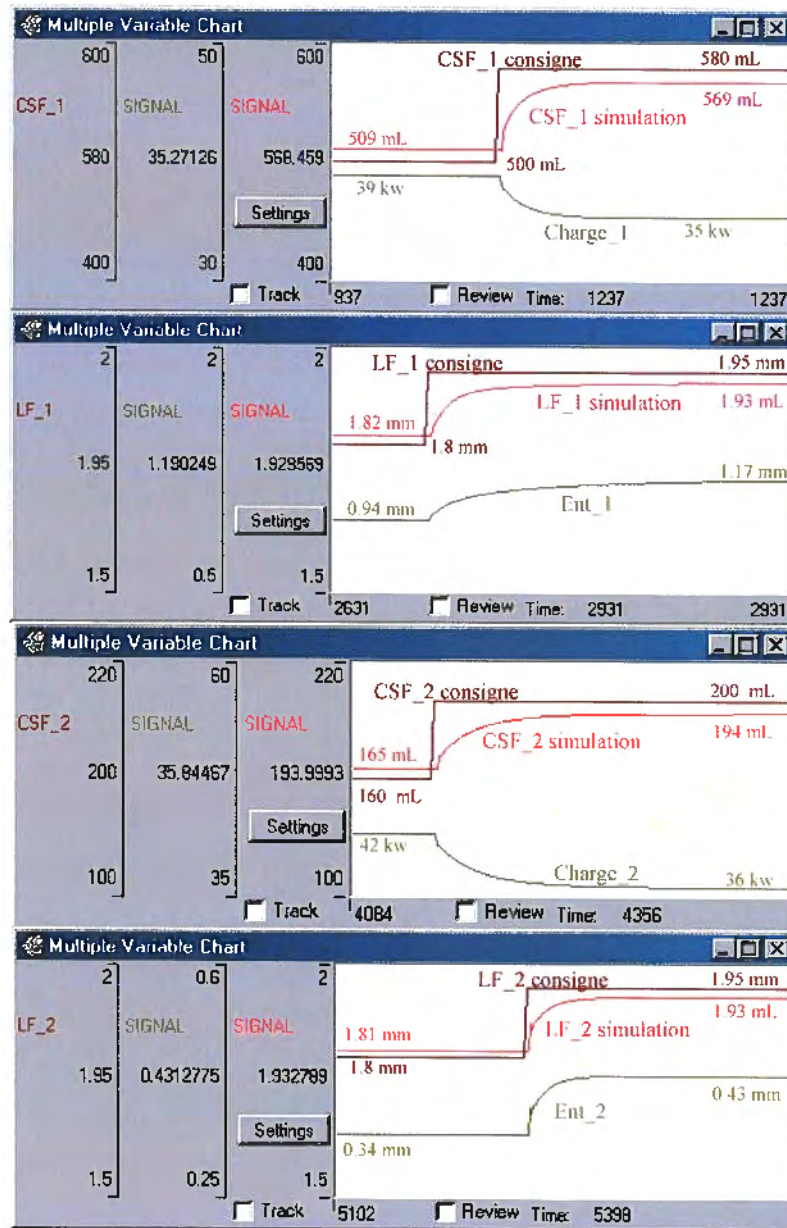


Figure 6.15 Réponses dynamiques des quatre contrôleurs suite à des changements séquentiels des quatre consignes CSF_1, LF_1, CSF_2 et LF_2

La figure 6.15 montre qu'après avoir changé la consigne de CSF_1 de 500 à 580mL, la Charge_1 diminue de 39 à 35 kw et la réponse de CSF_1 augmente dynamiquement. Il en va de même pour les contrôleurs de LF_1, CSF_2 et LF_2. On remarque qu'il y a toujours une erreur entre la consigne et la simulation à cause des contraintes décrites en 6.1.2. On peut obtenir une réponse plus précise en diminuant la valeur des contraintes.

Dans cet exemple on a utilisé 3% comme valeur d'erreur acceptable pour CSF_1, 2% pour LF_1, 3% pour CSF_2 et 2% pour LF_2.

6.4.1.2 Réponses à des changements simultanés

La figure 6.16 présente les réponses des 4 contrôleurs suite à un changement des 4 consignes en même temps: CSF_1 passe de 500 à 580mL, CSF_2 de 160 à 200mL, LF_1 de 1.85 à 1.95mm et LF_2 de 1.80 à 1.85mm.

On remarque une légère perturbation (de 0,4 mm à 0,41 mm à 0,4mm) sur la courbe de l'action de Ent_2 dans le contrôleur de LF_2. Elle s'explique par l'interaction entre les boucles de LF_2 et LF_1. En effet, LF_2 est non seulement affectée par Ent_2, mais bien sûr aussi par LF_1 qui est elle-même contrôlée par Ent_1.

Bien que Ent_2 a été perturbée, on remarque aussi que cette variable revient à sa valeur initiale de 0.4mm. Ceci s'explique par le fait que la Charge_2 est affectée non seulement par l'Ent_2, mais aussi par l'état de la pâte qui arrive au stade 2, par exemple la consistance et la rugosité de la pâte. Si on change la consigne de CSF_1, l'état de la pâte à la sortie du stade_1 est aussi changé et le contrôleur de LF_2 n'a peut-être pas besoin d'agir même lors d'un changement de sa consigne. C'est le cas ici, l'augmentation du CSF_1 amène des fibres plus longues au stade 2 et l'augmentation de consigne sur LF_2 est déjà comblée par l'action du contrôleur de CSF_1.

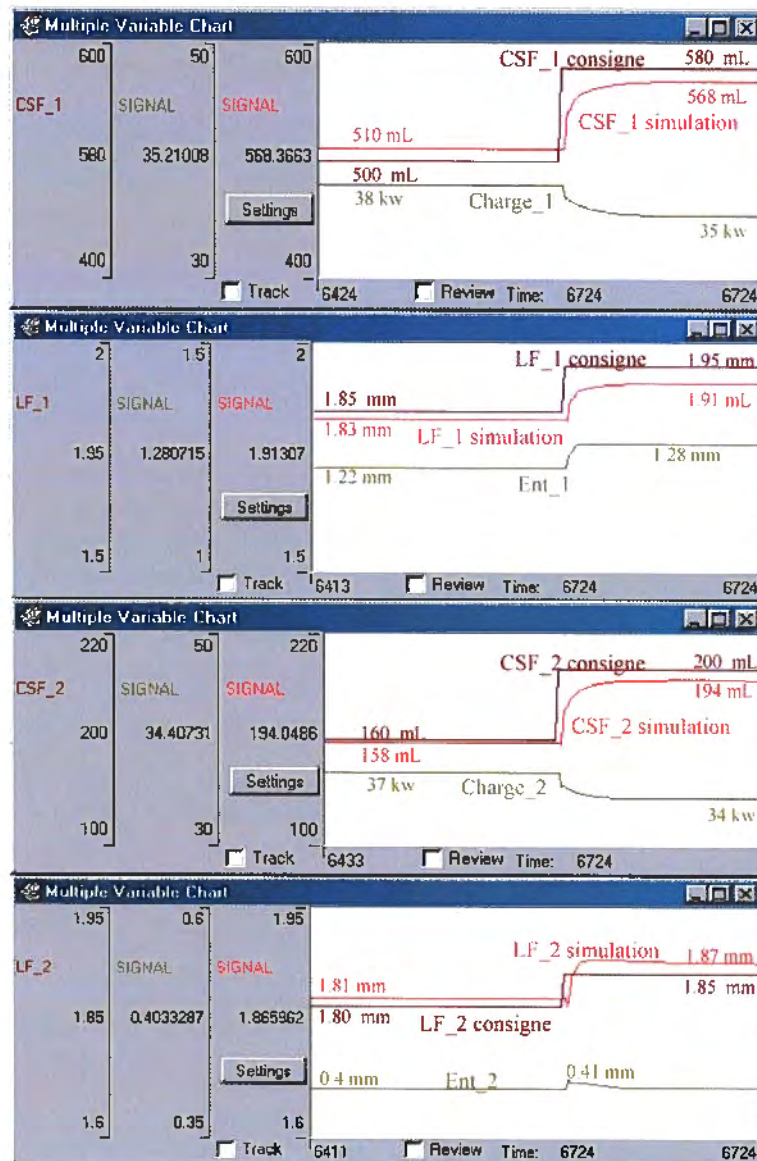


Figure 6.16 Réponses dynamiques des quatre contrôleurs suite à des changements simultanés des 4 consignes

6.4.2 Changements des caractéristiques de copeaux

Les divers modèles utilisés dans les CA prennent en compte les propriétés de copeaux. Des perturbations dans les caractéristiques de copeaux mènent donc à des ajustements des variables manipulées pour maintenir la qualité de la pâte, même si les consignes demeurent fixes.

6.4.2.1 Réponses à des changements séquentiels

Le système de CMS mesure les propriétés de copeaux en ligne. La figure 6.21 montre la relation entre les indices Luminance, H, S, L et l'âge des copeaux.

En général, les copeaux perdent une partie de leur humidité et de leur luminance avec le temps. De plus, les fibres deviennent plus fragiles et plus foncées. Dans ce contexte, si les consignes de pâtes sont fixées, par exemple si la consigne de LF_2 est constante, alors des copeaux plus âgés (et donc plus fragiles) exigeront un entrefer plus large.

	Âgés ← Copeaux → Frais		
H (teinte)	Maximum	Médiane	Minimum
Saturation	Maximum	Médiane	Minimum
Luminosité	Minimum	Médiane	Maximum
Luminance	Minimum	Médiane	Maximum

Figure 6.17 Relation entre les paramètres Luminance, H, S, L de la CMS et l'âge des copeaux

Le tableau 6-3 présente les coefficients multivariables entre les propriétés de copeaux, les variables manipulées et les propriétés des pâtes et papiers. Les valeurs plus élevées sont mises en italique.

Tableau 6-3 Relations entre les propriétés de copeaux, les variables manipulées et les propriétés des pâtes et papiers

	Luminance	H	S	L	Humidité
CSF_1	0.0812662	-0.24471	0.034166	-0.13871	0.1788245
CSF_2	0.1537925	-0.07939	-0.12994	0.167274	-0.1459866
LF_2	0.2024761	-0.06189	-0.35800	0.400688	-0.3785666
Rupture_2	0.0815029	0.020893	-0.27145	0.316542	-0.3032487
C_Diff_2	0.0124063	-0.10861	-0.0072	-0.06282	0.1108483
Ent_1	0.2025134	0.081879	-0.31264	0.469496	-0.4608471
Ent_2	0.0587045	0.09108	0.015987	0.057249	-0.0155853

À noter que la base de données ne contient pas les valeurs de LF_1, alors on n'a pas analysé la relation entre les propriétés de copeaux et LF_1 dans ce tableau.

En général, les corrélations dans ce tableau sont facilement explicables par les phénomènes physiques mis en cause. Par exemple, quand la luminance augmente, les copeaux sont plus frais; si l'entrefer est fixé, les fibres raffinées doivent être plus longues, ce qui fait augmenter CSF_1; c'est pourquoi la relation entre CSF_1 et Luminance est positive. On doit cependant se rappeler que les relations dans le tableau 6-4 utilisent la totalité de la base de données, laquelle inclut des groupes d'essai avec des composantes d'essence de bois différentes.

En pratique, toutes les propriétés renvoyées par le CMS (Lumin, H, L, S, Dens, Humid) devraient changer en même temps. En simulation on changera ici seulement une caractéristique de copeaux à la fois pour voir comment les contrôleurs répondent. On remarquera aussi dans les graphes qui suivent que les variables de stade 1 subissent un premier temps mort après le changement de propriétés de copeaux et que celles du stade 2 en subissent un deuxième.



Figure 6.18 Réponses dynamiques face à un changement de l'humidité

Changement de l'humidité des copeaux. Si la dilution (Dil_1) est constante et qu'on augmente l'humidité des copeaux (le poids de la masse des fibres augmente), la consistance doit diminuer. La force centrifuge augmente, ce qui réduit le temps de séjour, ce qui augmente l'intensité de raffinage. Le résultat: CSF_1 est augmenté [5]. À la figure 6.18 on remarque que l'augmentation de l'humidité (de 30 à 50) fait effectivement augmenter CSF_1 mais LF_1 ne change pas. Dans ce cas particulier on l'explique par le fait que cette propriété est demeurée dans la limite acceptable, et que donc Charge_1, Dil_1 et Ent_1 n'ont pas eu à être vraiment modifiés (peu d'action de contrôle). On remarque par contre que LF_2 et CSF_2 diminuent. Ceci s'explique par le fait que la réduction de la consistance du stade_2 fait minimiser le temps de séjour et augmenter l'intensité de raffinage, LF_2 devient plus courte [37], cela fait réduire CSF_2. Pour ne pas que LF_2 (consigne $LF_2=1.9\pm0.03\text{mm}$) et CSF_2 (consigne

CSF_2 = 162±4mL) diminuent au-dessous des limites acceptables (1.87mm et 158 ml dans ce cas), on remarque que l'Ent_2 augmente, la Charge_2 et la Dil_2 sont légèrement diminuées (action de contrôle) pour éviter la LF_2 et le CSF_2 ne dépassent la limite minimale.

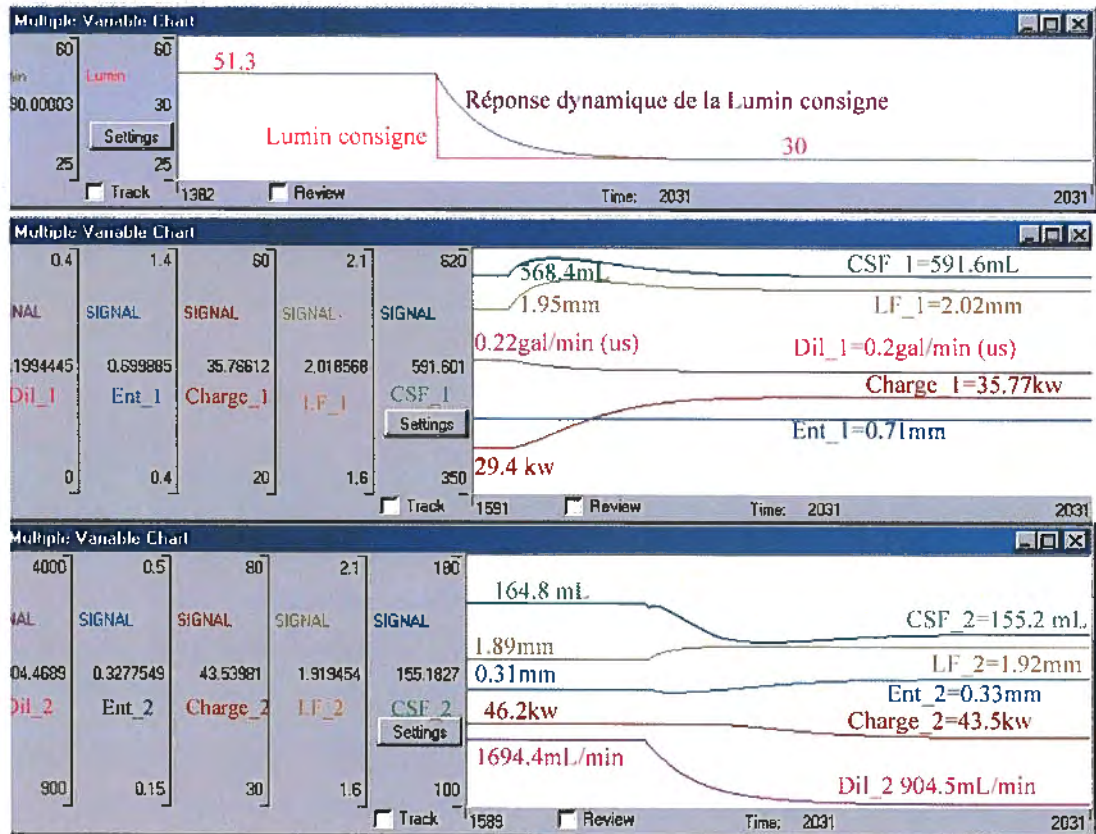


Figure 6.19 Réponses dynamiques face à un changement de la luminance

Changement de la luminance des copeaux. On remarque que la réduction de la luminance (copeaux plus âgés) cause une augmentation du CSF_1 et LF_1 (figure 6.19). La structure des copeaux âgés fait en sorte qu'ils sont plus durs et plus difficiles à couper et à développer, alors la Charge_1 doit être augmentée. La figure montre aussi une légère diminution de la Dil_1, par contre l'Ent_1 ne change pas parce que la LF_1 ne dépasse pas la limite maximale (1.98±0.05mm).

Pour le stade_2, CSF_2 diminue, mais LF_2 augmente. En effet, pour un même Ent_2, l'augmentation de la LF_1 fait augmenter la LF_2. Pour éviter que le CSF_2 ne soit

affecté par l'augmentation du CSF_1 dans le stade_1, le CA réduit la Dil_2, c'est-à-dire que la consistance de la pâte augmente, ce qui fait augmenter le temps de séjour. Les fibres subissent plus de développement, et donc le CSF_2 diminue [37], et ensuite, pour éviter que le CSF_2 réduise exagérément ($160 \pm 5 \text{ mL}$), la Charge_2 diminue et Ent_2 augmente. On peut voir clairement que sur la courbe du CSF_2, il y a une tendance de réduction puis une augmentation. De plus, en général, avec les mêmes composantes d'essence de bois, l'énergie spécifique totale est relativement stable. Autrement dit $\text{Charge}_1 + \text{Charge}_2 \approx \text{constante}$. Donc si Charge_1 augmente, Charge_2 doit diminuer et l'Ent_2 augmente, comme on remarque à la figure 6.19.

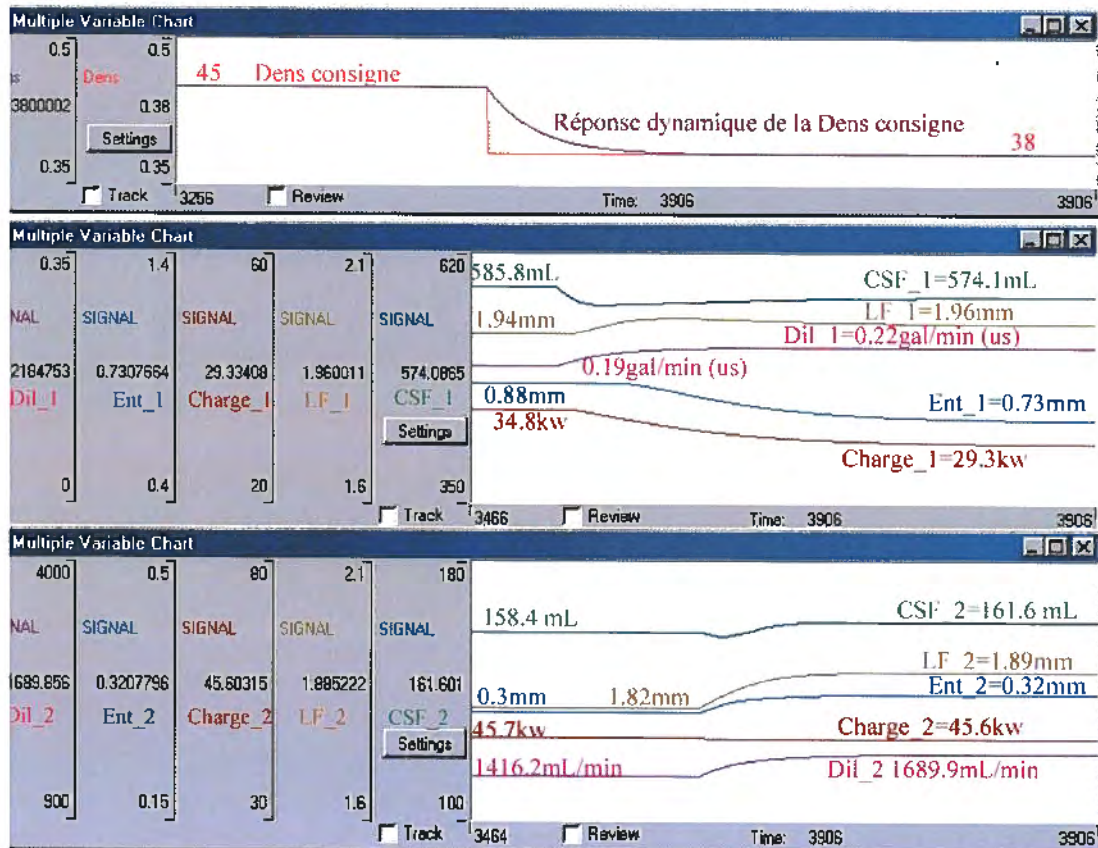


Figure 6.20 Réponses dynamiques au changement de la densité

Changement de densité des copeaux. Pour produire des pâtes à un certain CSF_1 fixé, le raffinage des copeaux moins durs a généralement besoin de moins d'énergie. Alors, avec la même énergie, si la densité diminue, c'est-à-dire si les copeaux deviennent moins durs

et plus facile à développer, alors le CSF_1 diminue. Pour maintenir CSF_1 près sa consigne, lors d'une diminution de densité, la Charge_1 est donc réduite. En général, si les copeaux sont moins durs, la longueur de fibre est plus longue. Pour contrôler le LF_1 sans dépassement de la limite maximale, Ent_1 diminue et Dil_1 augmente. Au stade 2, une augmentation de Dil_2 (diminuer le temps de séjour) et Ent_2 (augmenter LF_2) empêchent la tendance de réduction du CSF_2 (affecté par la réduction du CSF_1) et ensuite fait augmenter CSF_2. De plus avec le même Ent_2, les copeaux moins denses auront tendance à être coupés au stade_1, il en résulte une diminution de LF_2, c'est l'autre raison pourquoi on voit une augmentation de l'Ent_2 pour maintenir la consigne de LF_2 ($1.86 \pm 0.04 \text{ mm}$), avec une réduction un peu de la Charge_2 et pour ainsi moins développer les fibres.

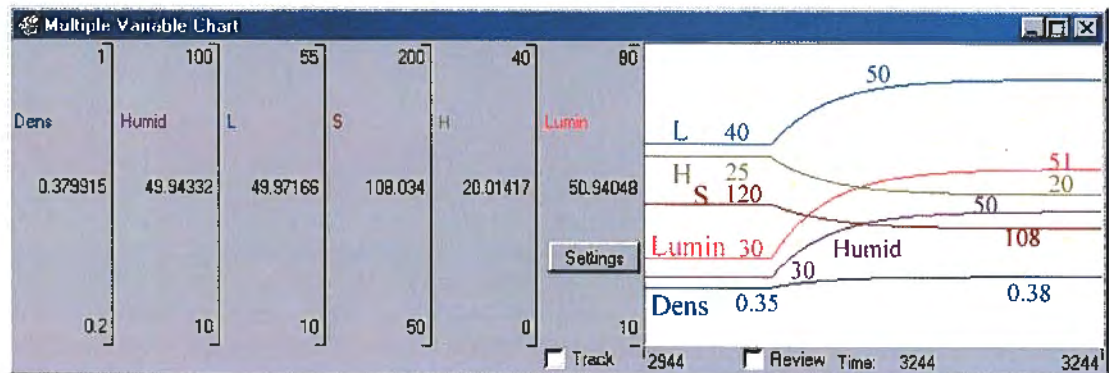


Figure 6.21 Changement des caractéristiques des copeaux

6.4.2.2 Réponses à des changements simultanés

On a fait aussi une simulation du changement des six caractéristiques de copeaux simultanément: Lumin de 30 à 51, H de 25 à 20, S de 120 à 108, L de 40 à 50, Humid de 30 à 50 et Dens de 0.35 à 0.38. Ces valeurs simulent en fait une augmentation de la fraîcheur des copeaux. La figure 6.21 montre les changements des propriétés de copeaux et la figure 6.22 montre les réponses dynamiques des propriétés des pâtes et papiers et des variables manipulées. L'influence des six caractéristiques de copeaux sur la qualité de la pâte et du papier peut être positive ou négative (tableau 6-3). L'influence finale est

le résultat interactif de ces six influences. On remarque que les CA ajustent les variables manipulées pour maintenir le mieux possible les propriétés des pâtes et papiers.

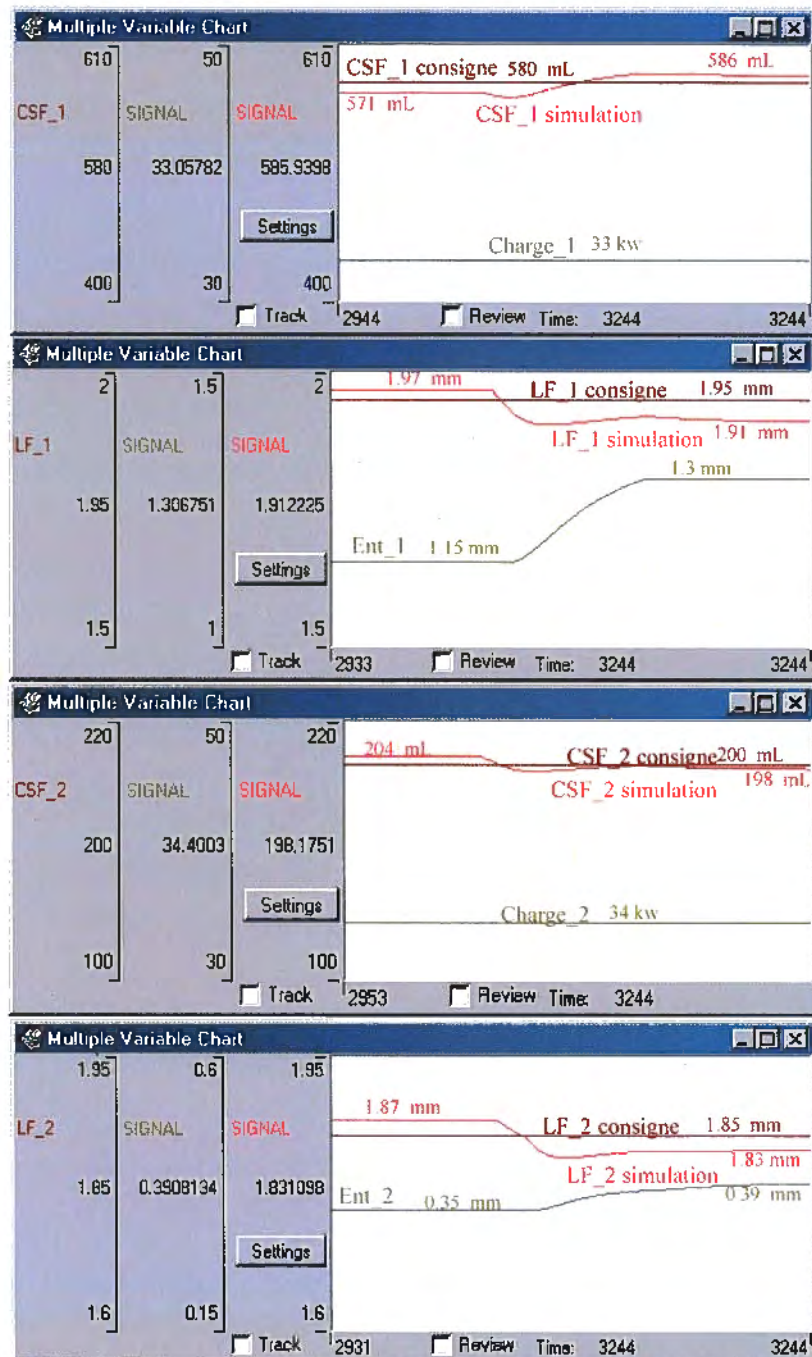


Figure 6.22 Réponses dynamiques suite à l'introduction de copeaux plus frais

L'augmentation simulée de la fraîcheur des copeaux fait réduire la longueur de fibres. Pour la maintenir on remarque que les 2 entrefers sont augmentés. Par contre l'augmentation de la fraîcheur reflétée par les données de la figure 6.20 fait en sorte que CSF_1 et CSF_2 demeurent à l'intérieur de leur limite acceptable, donc aucune action de contrôle sur Charge_1 et Charge_2 n'est requise.

6.4.3 Changements simultanés consignes-copeaux

Le tableau 6-4 montre trois groupes d'essais sur des changements de consignes (groupes I et II) et des changements de caractéristiques de copeaux (groupe III). On voit qu'après avoir changé les consignes et les propriétés de copeaux, les CA ajustent les variables manipulées pour maintenir la qualité des pâtes et papiers.

Tableau 6-4 Changements simultanés consignes-copeaux

	EP	SAP	PG	BOU	Lumin	H	S	L	Humid	Dens	Cons	1	Prod	1	Ent	1	DI	1	Temp	1	Charge	1	Ent	2	DI	2	Vit	2	Charge	2	CSF	1	CSF	2	LF	2
I	0%	20%	40%	40%	52	22	109	52	49	0,45	25	0,55			0,55	0,3	140	31,4	0,5	1516	3555	40								413	209	1,30				
															0,54	0,31	139,6	30,8	0,52	1608	3564	38								416	207	1,28				
															0,55	0,3	140	31,4	0,45	1516	3555	48								413	157	1,23				
															0,54	0,31	139,6	30,8	0,46	1608	3564	47								416	158	1,22				
II	100%	0%	0%	0%	47	27	89	71	28	0,43	19	0,338			0,8	0,2	140	40,2	0,42	948	3555	42								583	209	2,00				
															0,76	0,2	139	39	0,43	879	3530	38								584	209	1,95				
															0,8	0,25	140	25,3	0,4	1668	3555	46								583	165	1,90				
															0,78	0,23	140	27	0,38	1708	3563	45								583	168	1,92				
III	100%	0%	0%	0%	47	27	89	71	28	0,43	19	0,338			0,8	0,25	140	25,3	0,4	1668	3555	46								583	165	1,90				
															0,78	0,23	140	27	0,38	1708	3563	45								583	168	1,92				
					45	21	126	31	68	0,38	20	0,338			0,8	0,22	140	29,6	0,42	2009	3555	46								482	165	1,90				
															0,8	0,2	140	29,9	0,46	1800	3564	45,1								482	165	1,88				

Dans ce tableau les polices normales sont les variables initiales de la base de données, les polices italiques sont les variables calculées par les modèles inverses et directs, les polices grasses sont les changements de consigne ou de propriétés de copeaux dans un même groupe. Chaque groupe présente une situation initiale et des valeurs résultantes d'un changement de consigne ou de propriétés. Par exemple, dans le premier groupe, on simule un changement de consigne de qualité de pâte pour un mélange de copeaux sans

EP, avec CSF_2 qui passe de 209 à 157 mL, et LF_2 qui passe de 1.3 à 1.23 mm. Les CA ajustent les variables manipulées du procédé en conséquence, dans ce cas Ent_2 passe de 0.52 à 0.46 mm, Charge_2 augmente de 38 à 47 kw. Les RDN renvoient aussi les résultats effectifs de qualité de pâte: CSF_2 est réduit de 207 à 158mL, et LF_2 diminue de 1.28 à 1.22 mm.

Le deuxième groupe présente un changement de consignes des qualités de pâtes pour une essence pure, EP = 100%. Par rapport au groupe I, on voit donc que les propriétés de copeaux ont changé. On simule un changement de consigne de qualités de pâte avec CSF_2 qui passe de 209 à 167 mL, et LF_2 qui passe de 2.00 à 1.90 mm.

Dans le troisième groupe, on simule un changement simultané des consignes et des propriétés de copeaux, toujours avec EP = 100%. Les résultats sur les variables manipulées du procédé (police italique) sont près des valeurs de la base de données (police normale). Par rapport au groupe II, on peut donc dire qu'une partie de la différence est causée par la variation des caractéristiques de copeaux.

Les réponses des contrôleurs suite à des changements des consignes de Rupture_2 et C_Diff_2 seront présentées au chapitre suivant.

6.5 Avantages du contrôle par anticipation

La figure ci-dessous montre la structure de la simulation développée jusqu'ici. On y retrouve les modèles dynamiques, les modèles RDN, et les quatre contrôleurs de propriétés CSF_1, LF_1, CSF_2, et LF_2, en plus de son prédicteur R_P.

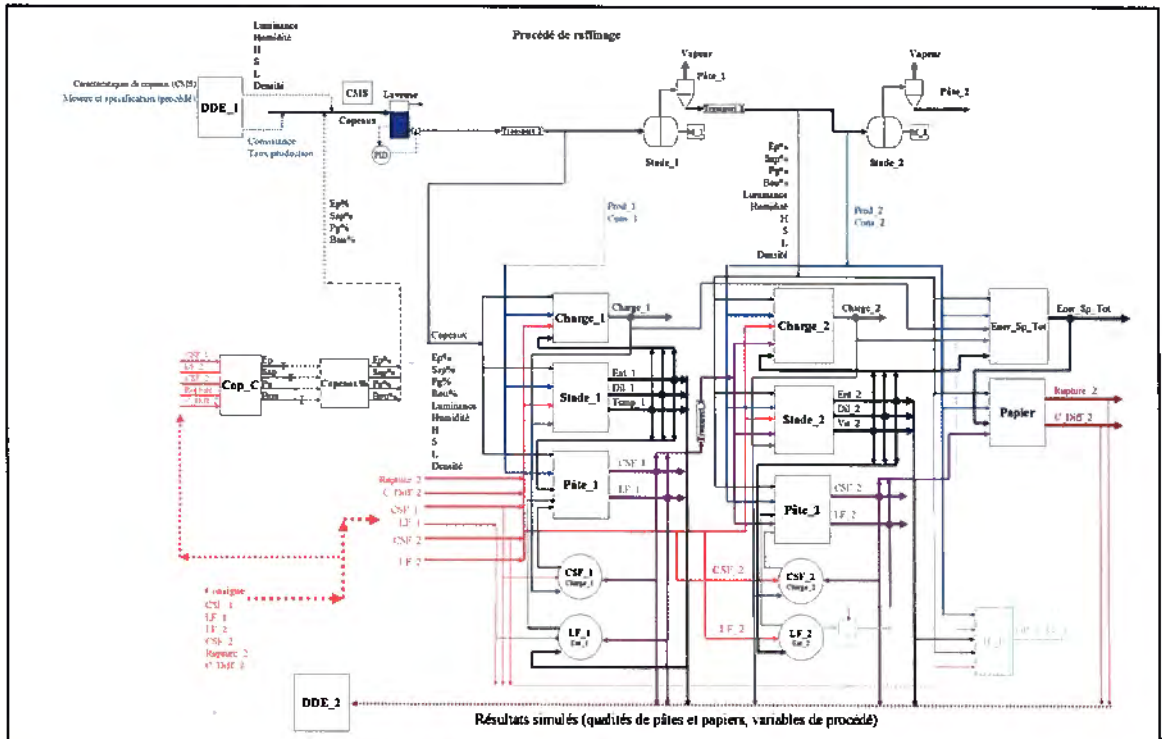


Figure 6.23 Schéma global des modèles et des contrôleurs

Pour démontrer les avantages du contrôle par anticipation (CA), un contrôleur PI conventionnel semblable à ce qu'on retrouve en usine a aussi été conçu en simulation. La figure 6.24 compare la structure de ces 2 types de contrôleurs. On remarque que les deux principales différences sont que le modèle conventionnel n'anticipe pas de valeur des variables manipulées, et qu'il ne considère pas les influences de copeaux.

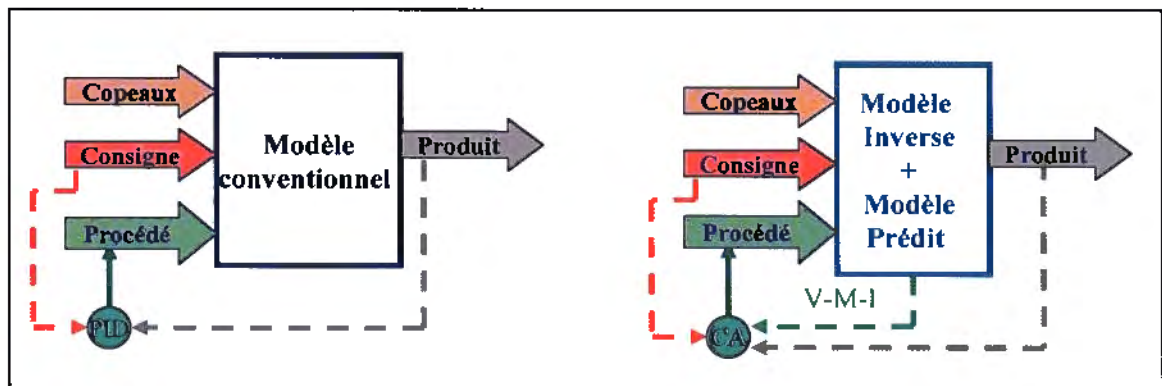


Figure 6.24 Comparaison de la structure entre le contrôleur CA et le PID conventionnel (V-M-I variable manipulée du procédé)

6.5.1 Comparaison avec 100% d'épinette

La figure 6.25 présente la comparaison du contrôle du CSF_1, CSF_2 et LF_2 avec ces deux types de contrôleurs (PI conventionnel et CA). Les entrées de la simulation sont constantes avec 100% EP. Une perturbation moyenne de 6% a été ajoutée aux signaux d'entrée pour simuler un signal plus réel (figure 6.25).

Un premier avantage important est que pour la même consigne de CSF_1 (582mL), CSF_2 (167mL) et LF_2 (1.9mm), le contrôle par anticipation présente moins de variation de la variable mesurée. On peut donc atteindre une moyenne plus élevée du CSF_2 qu'avec le modèle conventionnel (figure 6.27), autrement dit, plus près de la limite maximale. Il en résulte une consommation énergétique plus basse. Cet avantage sera exploité en détail au chapitre 8.

Tableau 6-5 Variables d'entrée initiales

EP	SAP	PG	BOU	Lumin	H	S	L	Humid	Dens	Cons_1	Prod_1	Cons_2
100%	0%	0%	0%	51,3	21,7	103,4	51,3	49,23	0,38	22,09	0,391	12

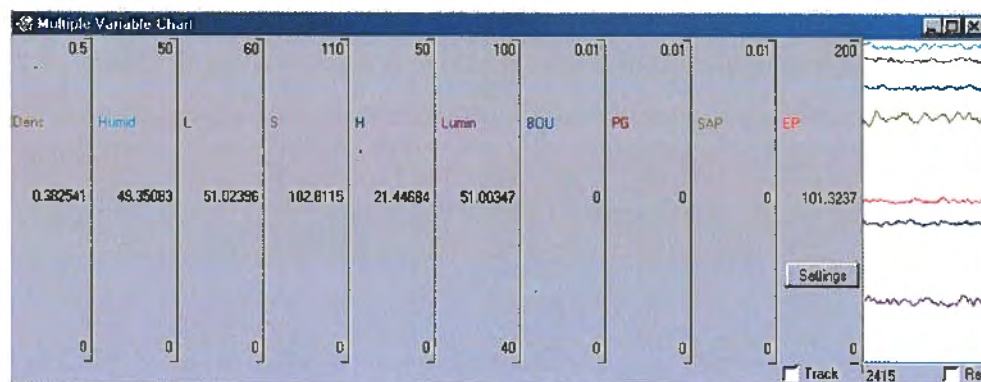


Figure 6.25 Signal des propriétés de copeaux (100% EP) en entrée de la simulation avec 6% de perturbation

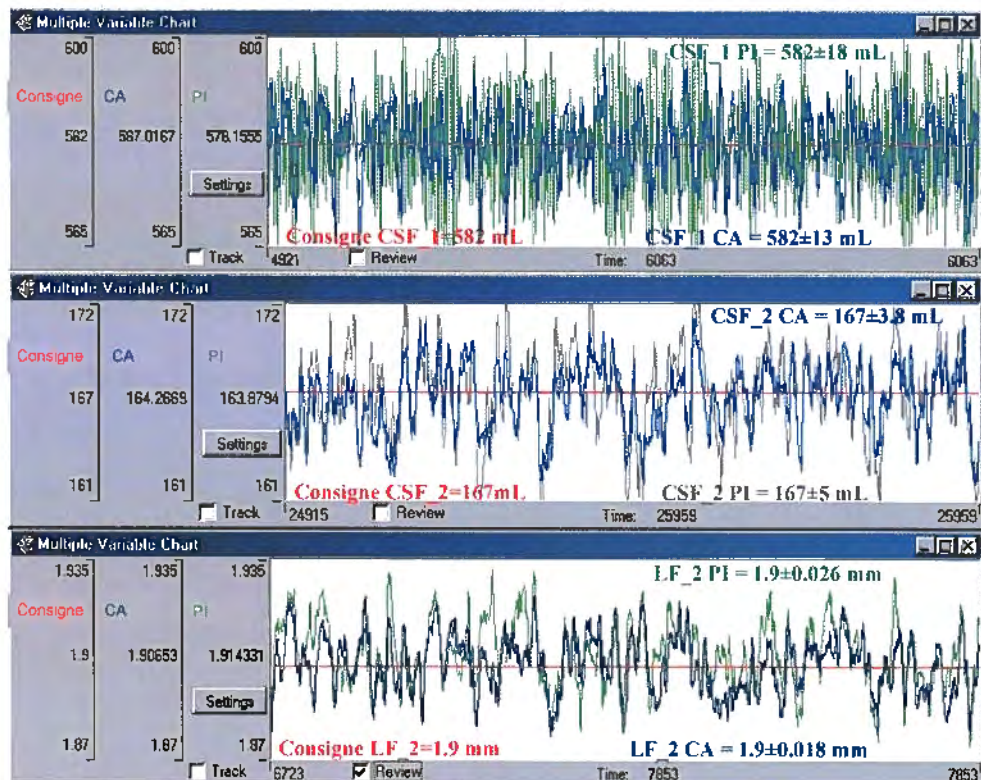


Figure 6.26 Comparaison du CSF_1, CSF_2 et LF_2 entre CA et PI conventionnel (100%EP)

On voit qu'avec le CA, pour CSF_1, l'erreur est réduite de 3.1% à 2.2%; pour CSF_2 de 3% à 2.3% et pour LF_2 de 1.4% à 0.95%.

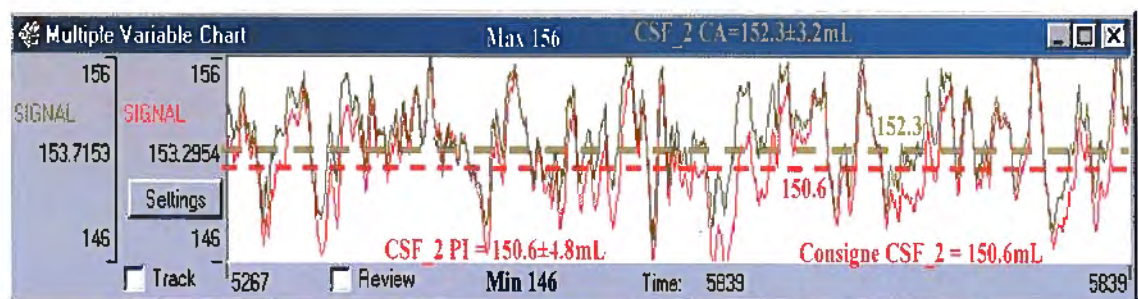


Figure 6.27 Comparaison de CA et PI avec la consigne CSF_2 à 150.6mL

La figure 6.27 montre une autre comparaison du contrôle du CSF_2 avec les mêmes entrées (tableau 6-5) mais avec une consigne différente (150.6mL). La figure 6.28 présente la distribution de la réponse de CSF_2 pour les 2 types de contrôleurs. On

remarque sur la distribution du CA que la ligne de moyenne s'approche davantage de la limite maximale de CSF_2.

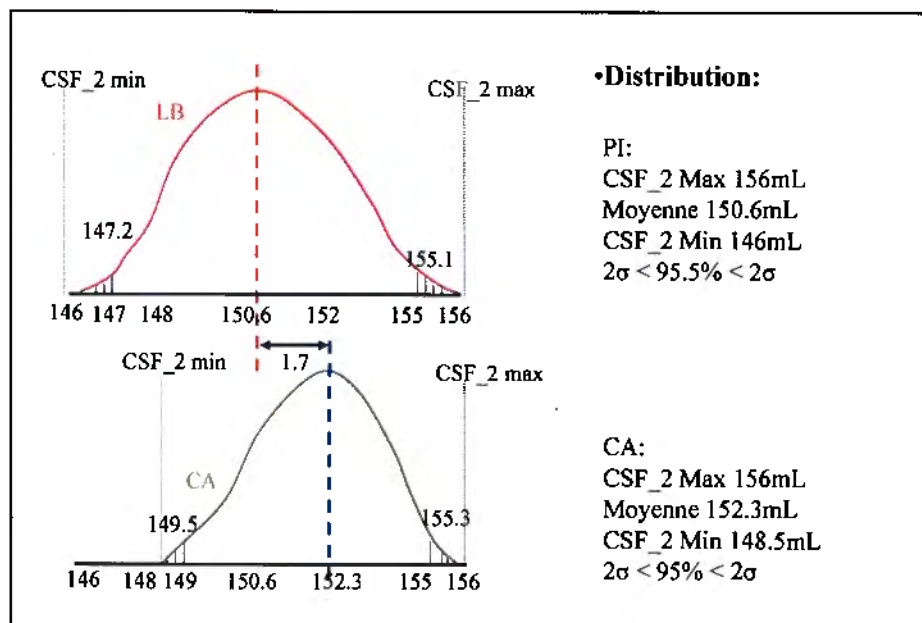


Figure 6.28 Comparaison de la distribution des sorties entre CA et PI avec 100% EP

6.5.2 Comparaison en utilisant la base de données

La figure 6.29 présente une comparaison de valeurs de CSF_2 obtenues avec le contrôleur PI conventionnel et le CA en utilisant la base de données. Un fichier Excel avec les 460 combinaisons de données a été envoyé à la simulation avec le lien DDE. Le pas de simulation a été fixé à une minute et une nouvelle ligne Excel était lue à chaque huit itérations, pour laisser le temps à la simulation de se stabiliser vu la grande variabilité entre chaque ligne du fichier Excel (une telle variabilité ne se rencontrerait pas en pratique).

Le contrôleur conventionnel présente un écart type de ± 5 mL de la réponse de CSF_2, alors que le CA donne seulement ± 3.2 mL. Pour un CSF_2 dont la limite maximale serait de 183 mL, on aurait donc une moyenne de CSF_2 = 177 mL pour le PI conventionnel et CSF_2 = 179 mL pour le CA (résultats pilotes).

Notons ici que les contrôleurs doivent exécuter de grandes actions pour garder le CSF_2 près de la consigne car les variables d'entrée de chaque ligne Excel sont très différentes entre les groupes d'essai. Ceci explique aussi la forme non standard des distributions de la figure 6.30.



Figure 6.29 Comparaison du CSF_2 obtenu des contrôleurs CA et PI, en utilisant tous les essais de la base de données

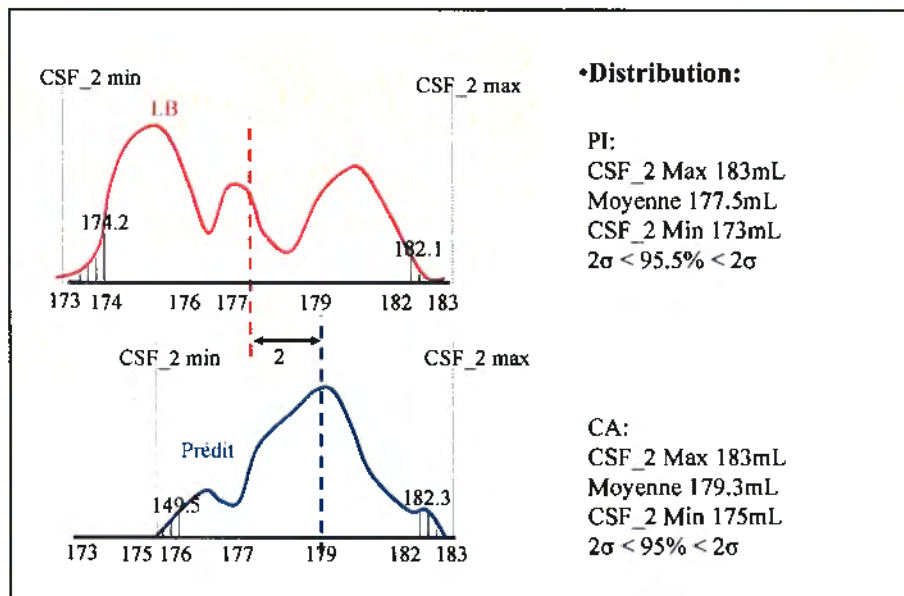


Figure 6.30 Comparaison de la distribution des sorties entre CA et PI (toute la base de données)

6.6 Limites des contrôleurs

6.6.1 Extrapolation de la base de données

Cette recherche utilise cinq consignes de qualité de pâtes et papiers. Comme les modèles RDN sont obtenus avec la base de données, en théorie si on sélectionne des consignes à partir d'un groupe d'essais expérimental dans la base de données, alors en simulation les divers CA doivent avoir la capacité de calculer un résultat assez près de ceux de la base de données. Ceci a d'ailleurs été confirmé au chapitre 4.

La même affirmation s'applique si on utilise des consignes qui interpolent les points de la base de données (en réalité, on a vu que dans certains cas il aura fallu utiliser des données supplémentaires générées par les modèles R_P).

Par contre, si on utilise des consignes hors des limites de la base de données, alors bien sûr l'erreur de simulation peut devenir plus grande. Ces consignes peuvent donc devenir impossibles à atteindre, même à l'intérieur des contraintes discutées à la section 6.1.2. Il faut aussi considérer que certaines combinaisons de consignes sont physiquement impossibles à atteindre. Par exemple, si $LF_1 = 1.9$ mm, on ne peut pas mettre LF_2 à plus de 1.9 mm. Également, si $CSF_1 = 200$ mL, il n'est pas raisonnable de mettre $CSF_2 = 250$ mL. De même, si les composantes de copeaux sont fixées (non contrôlées), il est difficile d'augmenter simultanément LF_2 , CSF_2 , $Rupture_2$ et C_Diff_2 , puisqu'en général, des surfaces de fibre moins développées font baisser ces deux dernières propriétés du papier.

6.6.2 Interaction des contrôleurs entre les deux stades

Le contrôle du deuxième stade peut être affecté par le contrôle du premier stade. En effet, les modèles RDN du stade 2 utilisent les sorties des modèles du stade 1 en entrée. Une variation de la pâte dans le premier stade peut donc influencer le contrôle du second stade. Les résultats simulés ne suivent donc pas toujours à la lettre les valeurs de la base de données. Par exemple, dans la base de données, pour une même valeur de $l'Ent_1 = 1.2$ mm, on trouve les combinaisons ($LF_2 = 1.9$ mm, $Ent_2 = 0.8$ mm), ($LF_2 = 1.8$ mm, $Ent_2 = 0.75$ mm). En simulation, on constate pourtant que sur un changement de

consigne de LF_2 de 1.9 à 1.8, l'Ent_2 ne change pas, alors que l'Ent_1 passe de 1.2 à 1.17 mm. C'est donc la LF_1 qui a été diminuée à presque 1.8 mm. Pour maintenir la cible $LF_2 = 1.8$, l'Ent_2 garde son état original (aucune action de contrôle). Des variations semblables entre la simulation et la base de données peuvent avoir lieu sur d'autres variables, par exemple la charge du moteur et le CSF.

Chapitre 7 Contrôle du mélange des copeaux

De nos jours on effectue facilement la mesure en ligne des propriétés des pâtes (telle que CSF) [94], mais on tarde à en faire de même avec certaines propriétés de papiers. Le contrôle dynamique de Rupture_2 et C_Diff_2 est donc basé sur les propriétés de pâte [95]. Les contrôleurs présentés au chapitre précédent gèrent les propriétés de pâtes CSF_1, LF_1, LF_2 et CSF_2. Si on augmente la consigne de CSF_2, il faut considérer que cela peut faire diminuer les propriétés du papier Rupture_2 et C_Diff_2. De plus, si les proportions initiales de chaque essence de copeaux initiaux sont fixées, les consignes de propriétés des pâtes peuvent parfois ne pas être atteintes. Par exemple, pour la consigne de CSF_2 = 160mL et Rupture_2 = 45, avec 100% de bouleau, on peut facilement atteindre le CSF_2 visé, mais il est difficile d'obtenir l'indice de rupture élevé. Il faut soit réduire la consigne de Rupture_2 ou ajuster le mélange de copeaux. Ce chapitre décrit donc les contrôleurs de mélange des copeaux qui ont été développés pour combler cette lacune. On suppose ici bien sûr que ce type de contrôle est réalisable physiquement dans l'usine (par exemple avec des vis de dosage).

7.1 Effets des essences sur les propriétés du papier

7.1.1 Effets sur Rupture_2

L'essence du bois peut affecter très significativement les propriétés des pâtes et papiers [96]. Au chapitre 4 on a déjà présenté la relation entre les essences du bois et les propriétés du papier. La relation entre BOU et Rupture_2 est négative, c'est à dire que l'augmentation de BOU fait diminuer la Rupture_2. L'effet de EP sur Rupture_2 est pour sa part positive. L'influence de BOU sur Rupture_2 (-0.843) est beaucoup grande que EP (0.48). Bien que les autres deux essences du bois SAP et PG affectent aussi Rupture_2, les relations sont relativement plus faibles (SAP 0.17 et PG -0.27). Dans cette recherche, on ajuste donc BOU pour contrôler la Rupture_2.

Si le débit d'alimentation du mélange de copeaux est fixé, alors une augmentation de la composante de BOU doit nécessairement entraîner une réduction des trois autres

composantes, incluant EP. Ceci implique que si on veut augmenter Rupture_2, le résultat de la réduction de la composante de BOU fera également augmenter la composante de EP, laquelle affectera elle aussi positivement la Rupture_2.

7.1.2 Effets sur C_Diff_2

Pour le C_Diff_2, les deux essences influentes sont EP (-60) et SAP (72). Les deux autres essences sont relativement moins influentes, PG (-23) et BOU (14). Puisque les influences de SAP et EP sur C_Diff_2 sont dans des directions opposées, une augmentation de SAP fait augmenter C_Diff_2, mais en même temps, la diminution de la composante de EP fait aussi augmenter C_Diff_2. On décide donc de contrôler le C_Diff_2 avec SAP.

Puisque EP affecte significativement les deux qualités de papier en sens inverse, si on augmente EP, Rupture_2 augmente mais C_Diff_2 diminue. Alors, pour contrôler EP il faut considérer ces influences en même temps (interactions). Dans un tel contexte, le contrôle de l'EP est conditionnel: si avec les contrôles de SAP et BOU seuls, on a réussi à minimiser les erreurs des deux qualités de papier dans la limite désirée, alors dans ce cas on n'a pas besoin de contrôler l'EP; si les erreurs des qualités de papier ne sont pas dans la limite acceptée et sont de signe inverses, alors dans ce cas on pourra agir en augmentant ou diminuant le pourcentage de EP.

7.2 Contrôle par anticipation de Rupture_2 et C_Diff_2

On utilise donc trois contrôleurs qui ajustent trois composantes d'essence du bois (BOU, SAP et EP) et minimisent les erreurs sur Rupture_2 et C_Diff_2. L'action d'ajustement des mélanges de copeaux a lieu après le contrôle des variables du procédé décrit au chapitre précédent, pour vérifier si le contrôle du raffineur à lui seul permet l'atteinte des consignes de Rupture_2 et C_Diff_2.

Le contrôleur de BOU calcule une valeur de $\Delta E1$, laquelle est additionnée avec la composante initiale de BOU prédite par le modèle inverse Cop_C, pour ainsi minimiser l'erreur entre Rupture_2 de simulation et sa consigne. La figure 7.1 présente le schéma

de simulation des contrôleurs de Rupture_2, C_Diff_2 et R_C (Rupture_2 + C_Diff_2) avec l'ajustement de la composante de BOU, SAP et EP, respectivement. La figure 7.2 montre le diagramme des contrôleurs par anticipation qui en résulte.

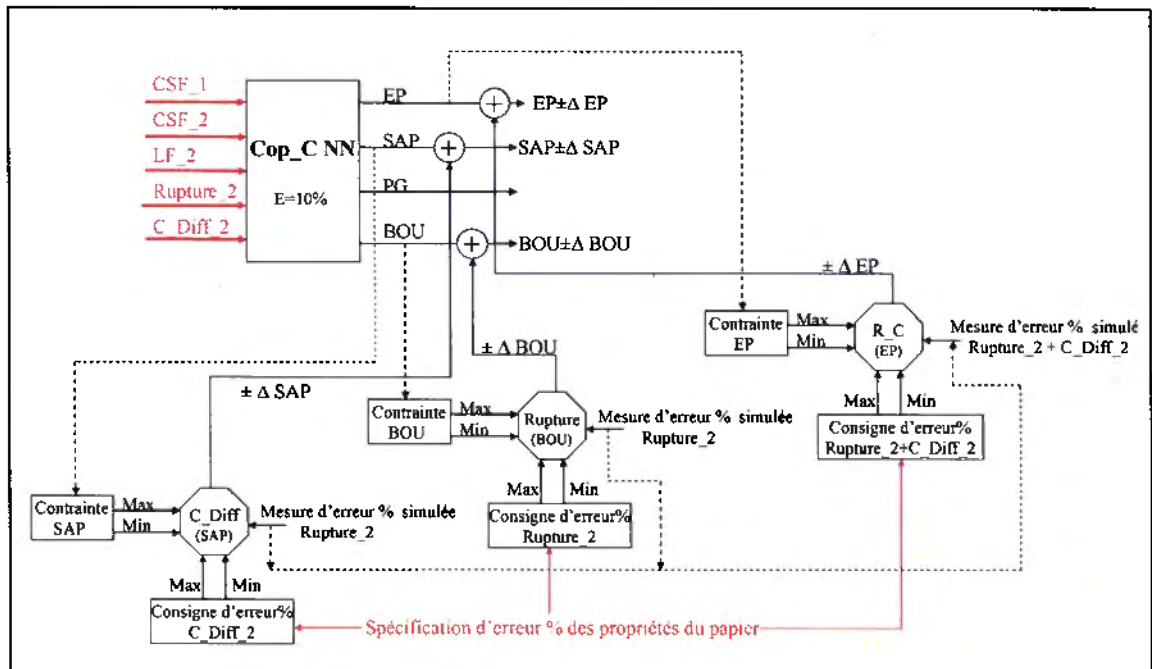


Figure 7.1 Schéma de simulation des contrôleurs de Rupture_2, C_Diff_2 et R_C

7.2.1 Calcul des limites de consignes

Les consignes de ces contrôleurs sont les limites désirées d'erreur en pourcentage. Par exemple, si la consigne Rupture_2 est 40 et on accepte une erreur de $\pm 5\%$, alors la limite de consigne du contrôleur BOU est aussi $\pm 5\%$ (figure 7.3). La variable mesurée est alors l'erreur en pourcentage (E1) entre le résultat simulé et la consigne de Rupture_2. Si cette erreur est à l'extérieur des limites (plus grande que 5%), le contrôleur BOU génère une valeur de ΔBOU pour ramener l'erreur sur Rupture_2 dans la limite désirée. Avec la même méthode, on peut contrôler l'essence de SAP pour minimiser l'erreur de C_Diff_2 (variable mesurée E2). Pour ce qui est du contrôle de l'EP, la variable mesurée du contrôleur d'EP sera $E3 = E1 + E2$.

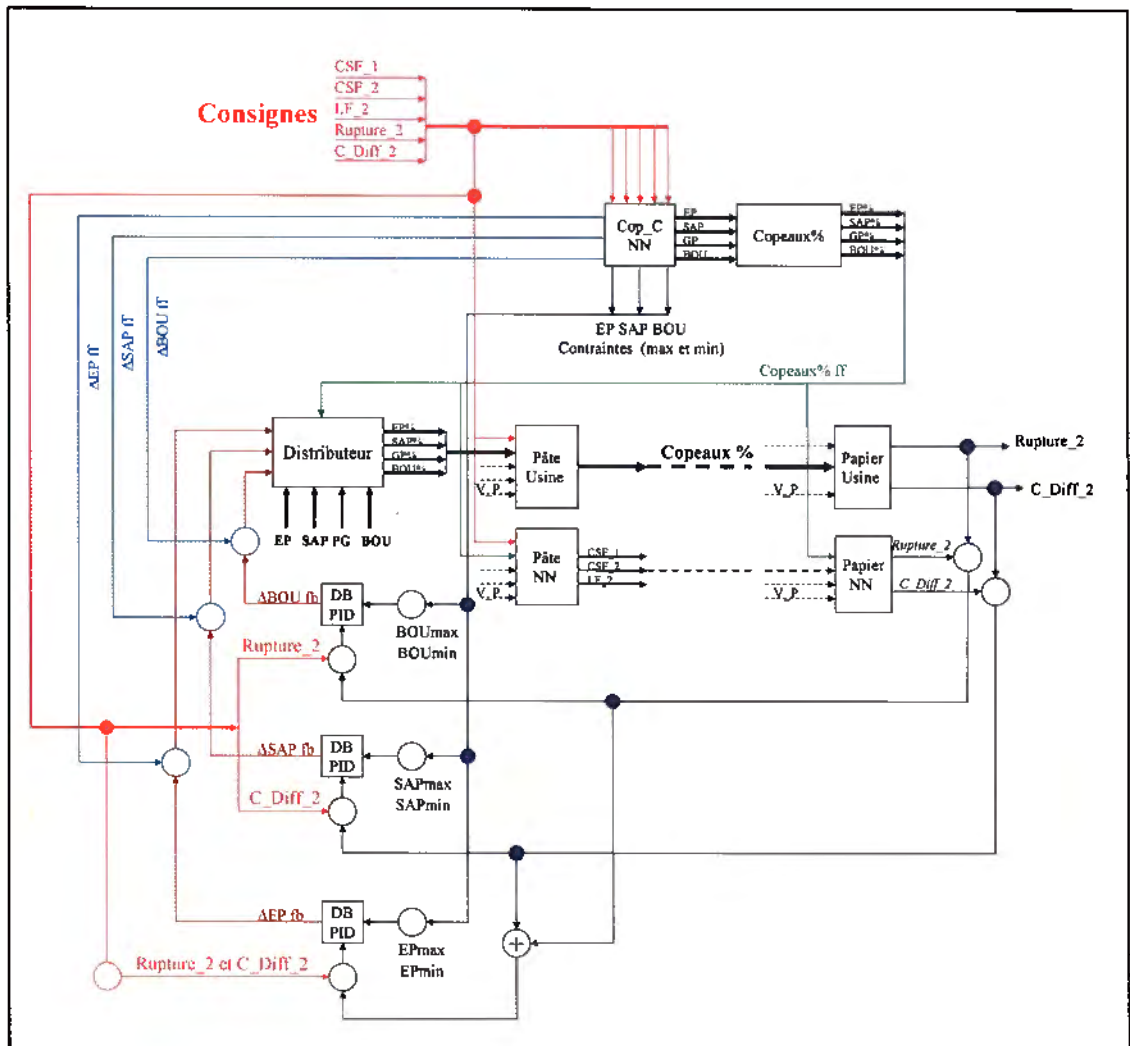


Figure 7.2 Diagramme des contrôleurs par anticipation de Rupture_2 et C_Diff_2

7.2.2 Contraintes sur les variables manipulées

Les contrôleurs sont aussi contraints par les valeurs maximales et minimales des variables manipulées (figure 7.3). Au début de la simulation, le modèle inverse de copeaux Cop_C anticipe une première estimation des composantes de copeaux. Les contrôleurs de mélange peuvent seulement faire un ajustement limité à partir de cette estimation. Par exemple, pour les consignes CSF_1=580mL, CSF_2=160mL, LF_2=1.82mm, Rupture_2=42, C_Diff_2=55, et en utilisant une erreur de 10%, le modèle de Cop_C anticipe un mélange initial: EP=43%, SAP=42%, PG=12% et

BOU=3% . Dans ce cas, les actions des contrôleurs de copeaux seront donc limitées à:
 $EP=43\pm4.3\%$, $SAP=42\pm4.2\%$, et $BOU=3\pm0.3\%$.

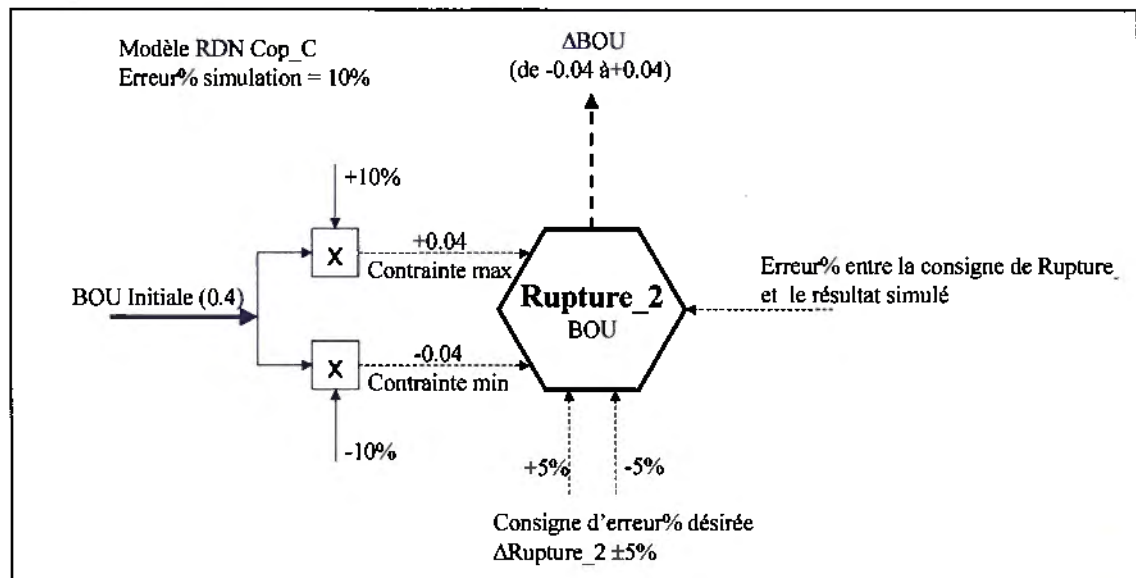


Figure 7.3 Contraintes sur les variables manipulées et mesurées

7.2.3 Compléments de logique

7.2.3.1 Mise en attente des contrôleurs de Rupture_2 et C_Diff_2

La figure 7.4 montre le principe de mise en attente. L'idée derrière cette logique est de voir si un contrôle du procédé peut à lui seul répondre aux consignes de pâtes désirées. Sinon, on peut alors décider de mettre en application les contrôleurs d'essences.

On commence par les entrées de consigne (au point 1). Le modèle de Cop_C calcule aussi les quatre composantes d'essence de copeaux à partir des consignes (le point 2). Puis, c'est au tour des modèles inverses et directs d'entrer en action pour générer les variables de procédé (calculées par les modèles inverses et le contrôleur II, au point 3) et les résultats prédits (générées par les modèles directs, au point 4). Durant cette période les composantes de copeaux sont demeurées constantes (mise en attente au point 5). Mais si l'erreur calculée sur Rupture_2 et C_Diff_2 n'est pas dans la limite acceptée après cette action des contrôleurs des raffineurs (contrôle II), alors l'interrupteur au point 6 fermera et le contrôleur I commencera à ajuster les composantes de copeaux par la mise en action des trois contrôleurs de copeaux décrits précédemment.

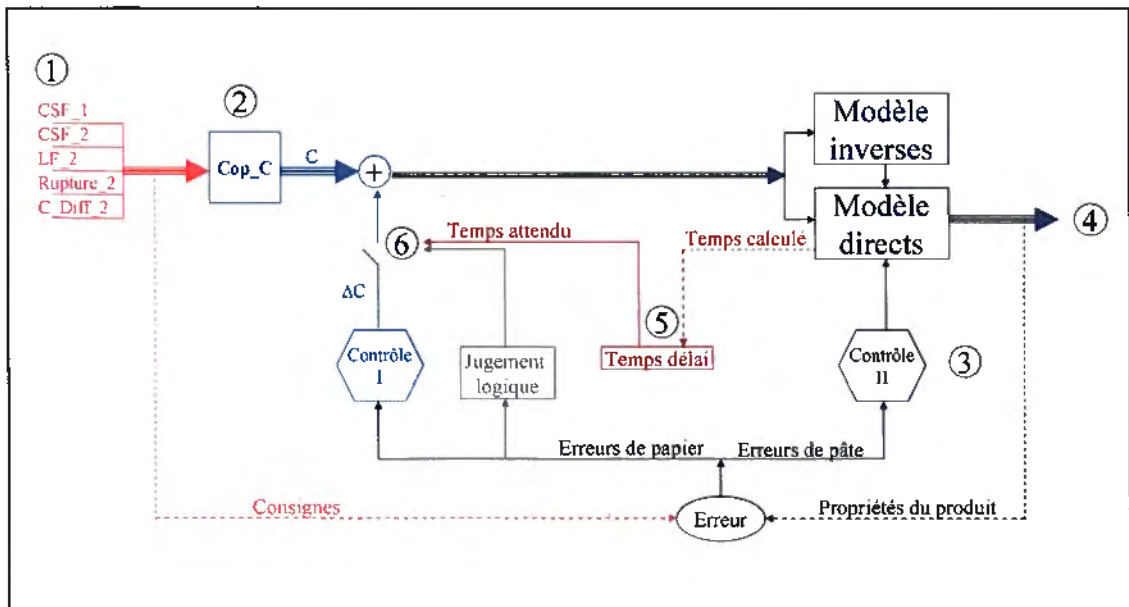


Figure 7.4 Diagramme simple de la logique de mise en attente

7.2.3.2 Action conditionnelle des contrôleurs

La figure 7.5 est un résumé de la logique conditionnelle utilisée pour mettre les contrôleurs d'essence en action ou non. Pour chacun des trois modules de multiplication dans cette figure, on constate qu'il y a trois entrées et une sortie. La première entrée concerne la mise en attente. Durant la mise en attente, l'entrée 1 est à zéro, et après le temps de mise en attente, cette entrée égale 1. La seconde entrée concerne la valeur de l'erreur acceptable par l'utilisateur. Si cette erreur est à l'intérieur des limites, l'entrée 2 égale zéro, sinon elle égale 1. L'entrée 3 est l'action du contrôleur, i.e. la variation de composante de copeaux. On voit donc que l'action générée par les contrôleurs d'essence est prise en considération seulement si le temps de mise en attente est écoulé et si l'erreur est à l'extérieur de la limite fixée.

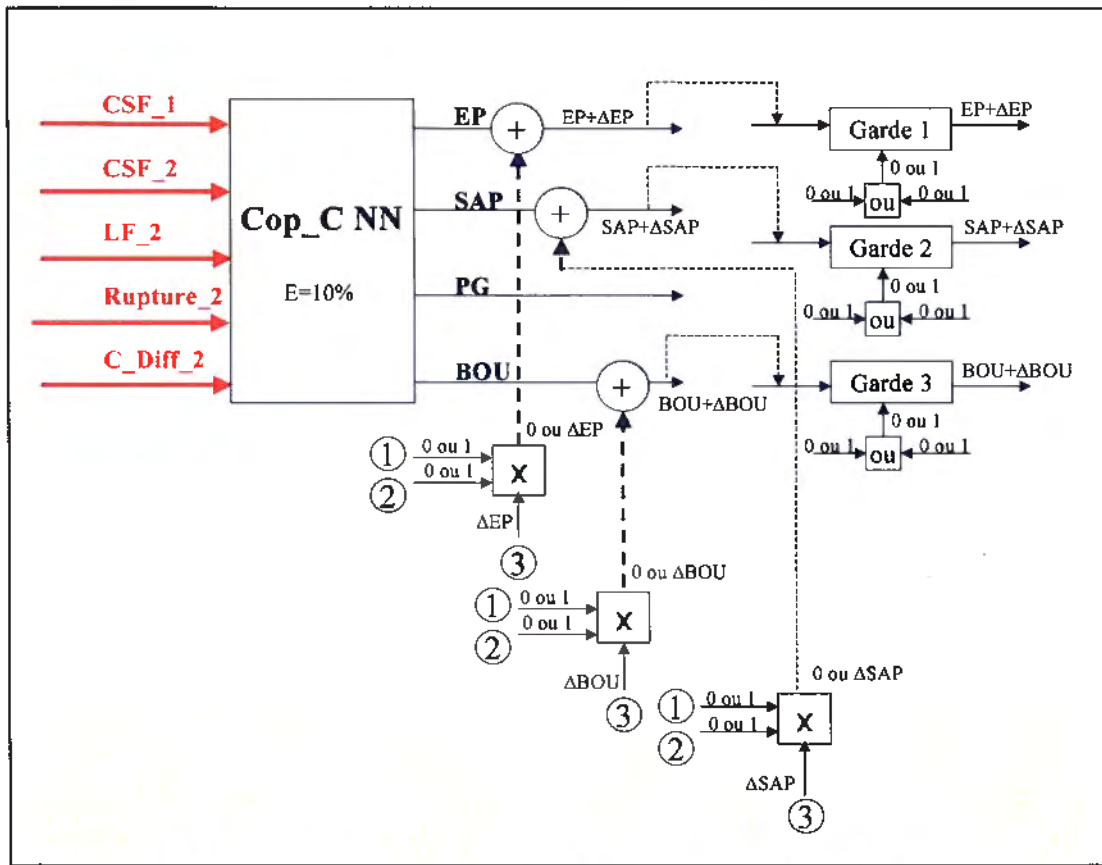


Figure 7.5 Schéma simplifié du principe d'actions conditionnelles pour BOU, SAP et EP

7.2.3.3 Modèle de garde

On utilise trois modèles de Garde pour prendre les trois valeurs instantanées aux sorties de Cop_C. Le modèle de Garde a deux entrées et une sortie. Une entrée prend la valeur du mélange (i.e. BOU=0.4), l'autre entrée (0 ou 1) sert à contrôler la valeur de sortie. Si cette entrée = 1, l'entrée égale la sortie. Si cette entrée = 0, la valeur de sortie demeure fixée à la dernière valeur du mélange; autrement dit, toute autre nouvelle valeur de mélange en entrée sera ignorée.

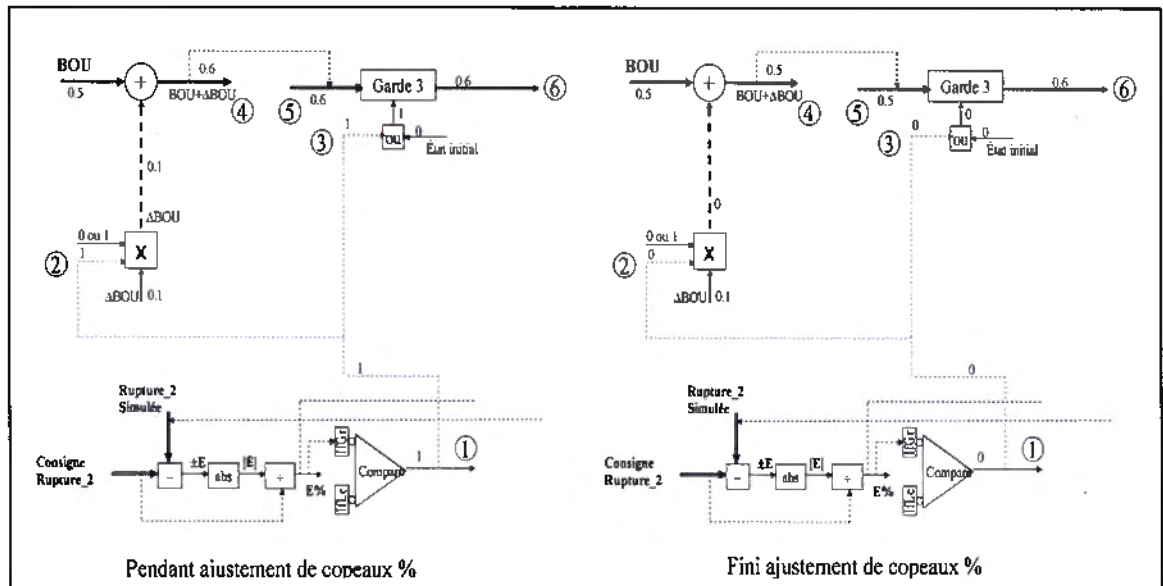


Figure 7.6 Comparaison entre les deux états du jugement sur le modèle de Garde

La figure 7.6 montre la comparaison entre ces deux états du modèle de Garde. Supposons que $BOU = 0.5$, tel que calculé par le modèle de Cop_C, et que $\Delta BOU = 0.1$, tel que généré par le contrôleur de Rupture_2. Si l'erreur $E1$ entre la consigne et la valeur calculée de la Rupture_2 n'est pas dans la limite désirée, alors la sortie de Compare égale 1 (point 1 dans la section gauche de la figure 7.6) et cette valeur se propage aux points 2 et 3. L'entrée inférieure du modèle de Garde est aussi à 1, et donc la valeur de la sortie de ce modèle de Garde (point 6) égalera son autre entrée (au point 5, valeur = 0.6).

Lorsque $E1$ revient dans la limite désirée, la sortie de Compare redevient 0 tout comme l'entrée inférieure du modèle de Garde. Le modèle conserve donc sa sortie à 0.6, même si à ce moment l'entrée du BOU est de 0.5 (figure 7.6, diagramme de droite). Autrement dit la sortie du modèle de Garde maintient la valeur du pourcentage de BOU.

7.2.3.4 Action conditionnelle supplémentaire sur EP

La stratégie du contrôle de l'EP% est un peu plus complexe. Elle est basée sur quelques conditions logiques, incluant bien sûr l'erreur E3 mais aussi la tendance de variation de Rupture_2 et C_Diff_2. La figure 7.7 sert à expliquer la logique d'action conditionnelle de EP.

On utilise +1 et -1 pour présenter les tendances de variation sur Rupture_2 et C_Diff_2, aux points 1 et 2. Par exemple, si Rupture_2 simulée < consigne de Rupture_2, dans ce cas, $\text{Rupture_2 simulée} - \text{consigne de Rupture_2} < 0$, alors au point 2, la valeur de la tendance = -1, c'est à dire que pour minimiser l'erreur de simulation, on doit augmenter la valeur de Rupture_2 simulée. Pour l'entrée du modèle logique de négation (NON sur la figure), on constate que quand les tendances de Rupture_2 et C_Diff_2 sont opposées, l'entrée de NON est $(+1) + (-1) = 0$, et dans ce cas, la sortie logique du module NON est 1. Par contre, si l'entrée $\neq 0$, la sortie = 0.

Le modèle de Compare au point 5 est utilisé pour juger si la somme de l'erreur de Rupture_2 et C_Diff_2 est à l'intérieur la limite désirée. Pour le modèle logique de ET, la sortie égale 1 (point 7) seulement quand les deux entrées sont à 1 (les points 5 et 6). Il faut donc avoir simultanément deux conditions pour activer le contrôleur de EP: 1) tendances de Rupture_2 et C_Diff_2 opposées ; 2) somme de l'erreur de Rupture_2 et C_Diff_2 hors de la limite désirée.

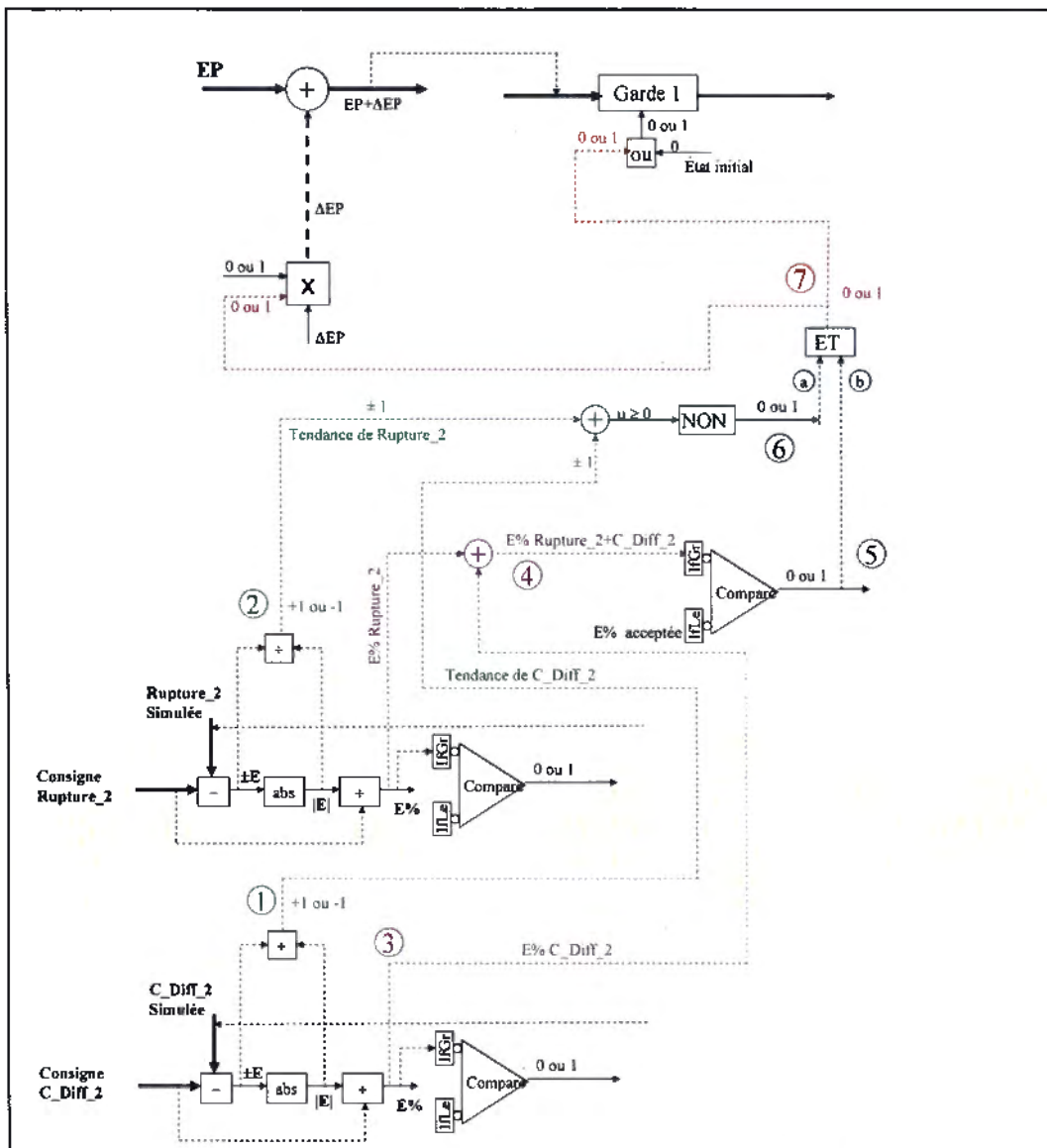


Figure 7.7 Schéma de la logique d'action conditionnelle de EP

7.2.3.5 Résumé des contrôles logiques des composantes de copeaux

La figure 7.8 montre le schéma complet de la logique de contrôle des composantes de copeaux, dont le principe de fonctionnement est le suivant.

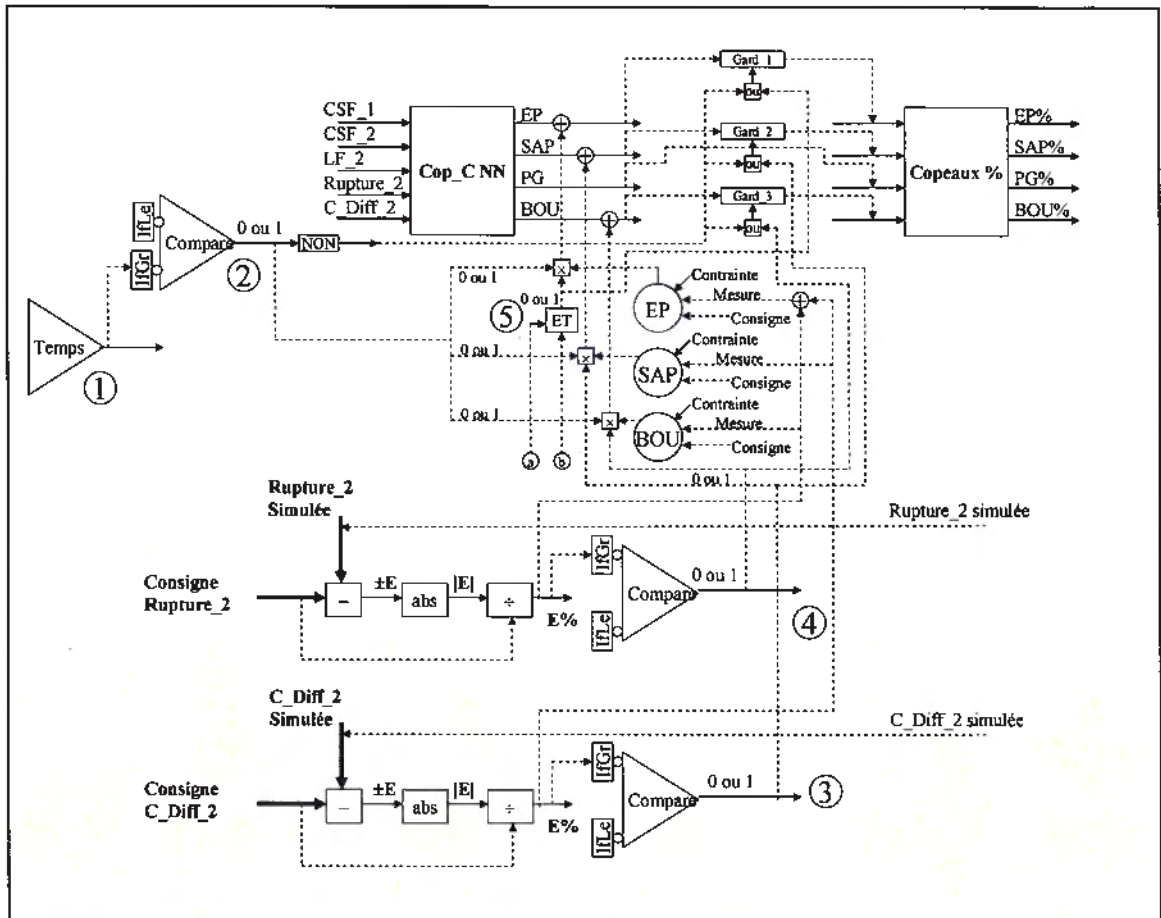


Figure 7.8 Schéma détaillé de la logique du contrôle des composantes de copeaux

Supposons qu'au point 1, le temps de simulation initial est zéro. On notera ici les temps de transport pour les deux stades par T1 et T2; la constante de temps du mélangeur par T3; et le temps d'action des raffineurs par T4. On définit aussi la période $T_p = T1 + T2 + T3 + T4$. Durant cette période, la sortie du Compare au point 2 égale zéro. En conséquence, les entrées du modèle de Copeaux % égalent les sorties de Cop_C, c'est-à-dire que les contrôleurs de copeaux ne fonctionnent pas encore à ce moment. Après la période T_p , la sortie de Compare au point 2 devient 1.

Durant toute la période T_p , la valeur de sortie du module logique NON au point 2 égale 1, mais après T_p elle devient zéro. L'utilisation de ce module NON est pour assurer de passer la sortie de Cop_C par le modèle de Garde pendant le T_p . Aux points 3 et 4 on retrouve les résultats logique (0 ou 1) sur les erreurs acceptables de Rupture_2 et

C_Diff_2. Les points « a » et « b » pour les deux entrées du module logique ET au point 5 sont liés les deux points « a » et « b » dans la figure 7.7.

7.3 Réponses en boucle ouverte

Dans les sections suivantes on présente les calibrations pour chaque contrôleur d'essence. On utilise encore $\lambda = 3 \tau$.

7.3.1 Calibration du contrôleur de Rupture_2

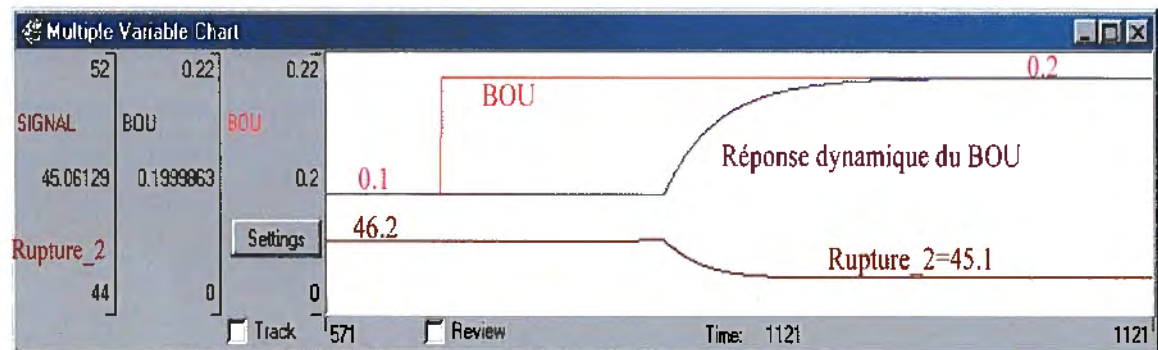


Figure 7.9 « bump test » du contrôleur de Rupture_2 par action sur BOU

$$K_p = (45.1 - 46.2) / (0.2 - 0.1) = -11$$

$$K_c = (1 / -11) * (1 / 3) = -0.028$$

7.3.2 Calibration du contrôleur de C_Diff_2

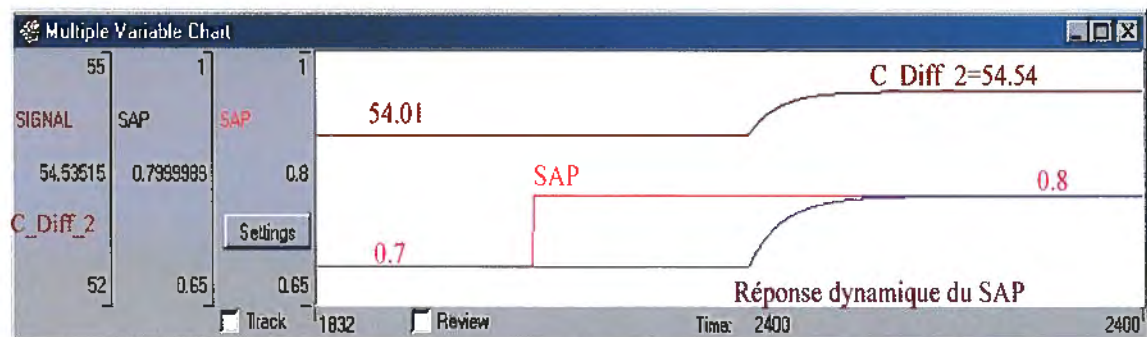


Figure 7.10 « bump test » du contrôleur de C_Diff_2 par action sur SAP

$$K_p = (54.54 - 54.01) / (0.8 - 0.7) = 5.3$$

$$K_c = (1 / -5.3) * (1 / 3) = 0.058$$

7.3.3 Calibration du contrôleur de Rupture_2 et C_diff_2

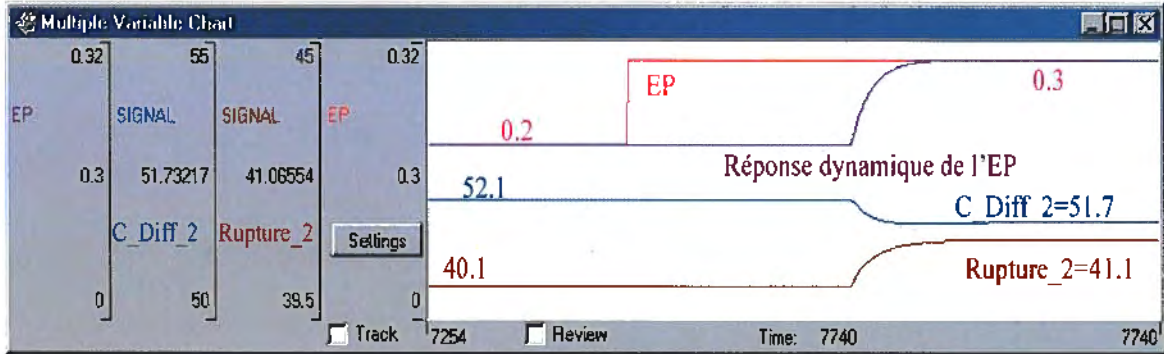


Figure 7.11 « bump test » du contrôleur de Rupture_2 + C_Diff_2 par action sur EP

$$K_p = (|40.1 - 41.1| + |51.7 - 52.1|) / (0.3 - 0.2) = 14$$

$$K_c = (1 / 14) * (1 / 3) = 0.026$$

Pour le calcul de K_p , on remarque que la somme des variances absolues de Rupture_2 et C_Diff_2 a été utilisée.

7.4 Réponses en boucle fermée

Cette section présente la réponse dynamique en boucle fermée des contrôleurs de mélange suite à des changements de consignes. Il faut indiquer ici que les perturbations sur les caractéristiques de copeaux n'affectent pas ces contrôleurs, puisque c'est seulement après que les composantes d'essence du bois ont été déterminées que le système de CMS peut mesurer les propriétés de ces nouveaux copeaux. L'ajustement des composantes de copeaux a donc lieu avant le CMS.

7.4.1 Changements de consigne

7.4.1.1 Réponses à des changements séquentiels

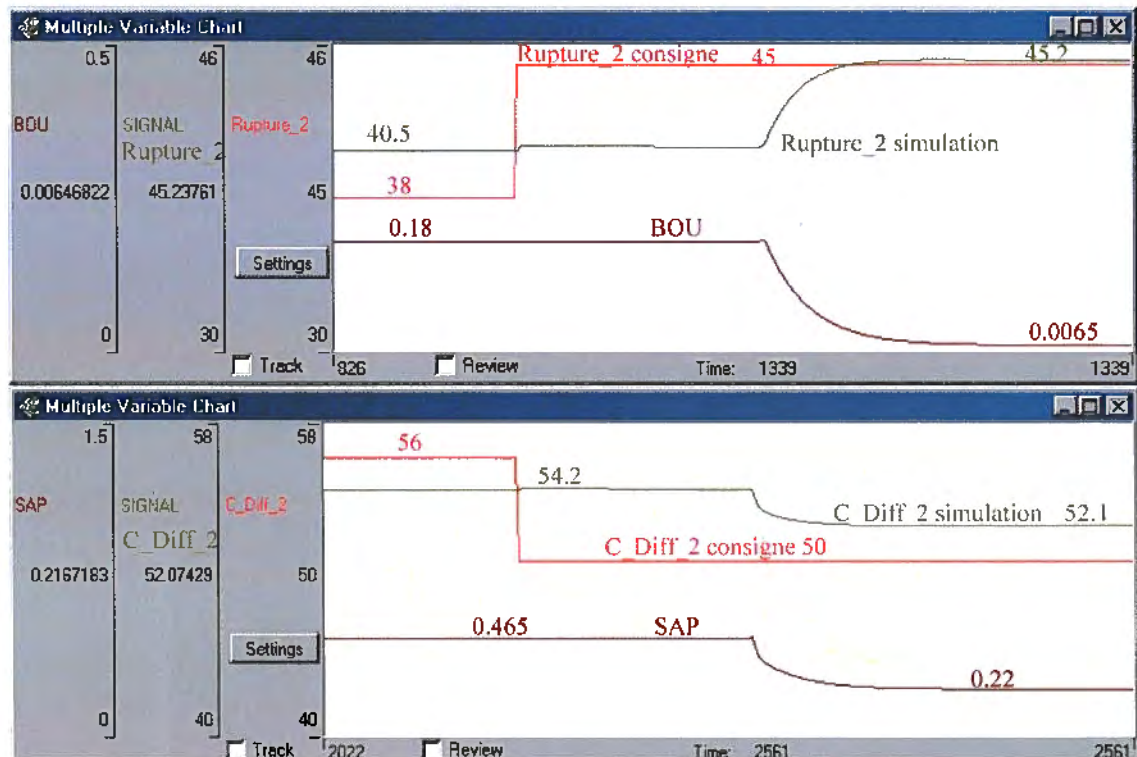


Figure 7.12 Réponses dynamiques des contrôleurs de Rupture_2 (haut) C_Diff_2 (bas) face à des changements séquentiels de consigne

La figure 7.12 montre une augmentation de la consigne de la Rupture_2 de 38 à 45, ce qui amène une action de réduction de la composante de BOU de 0.18 (18%) à 0.0065 (0.65%). On remarque un délai entre le changement de consigne et le changement de la valeur de Rupture_2 à cause du temps de transport de la pâte.

On voit qu'avant le changement de consigne, la composante de BOU est de 0.18. Avec cette valeur l'erreur entre la consigne et la valeur simulée de Rupture_2 est dans la limite désirée (erreur = $[40.5 - 38] / 38 = 6.6\%$, la limite spécifiée est de 7%). La limite d'erreur est également respectée après le changement de la consigne (nouvelle erreur égale $(45.2 - 45) / 45 = 0.45\%$, BOU% reste fixe à 0.0065).

Pour C_Diff_2 (figure 7.12 en bas), après avoir changé la consigne de 56 à 50, on remarque une diminution de SAP, de 0.47 à 0.22. Le changement de la consigne de C_Diff_2 fait que Cop_C anticipe de nouvelles composantes d'essence de copeaux (nouveau mélange) et ensuite, le contrôleur de C_Diff_2 ajuste plus finement le SAP pour ramener sa valeur plus près de la consigne. L'erreur spécifiée dans ce cas était de 5%.

La figure suivante montre la réponse du contrôleur de Rupture_2+C_Diff_2. Après avoir augmenté Rupture_2 de 42 à 46 et réduit C_Diff_2 de 56 à 51, l'EP augmente de 33% à 80%.

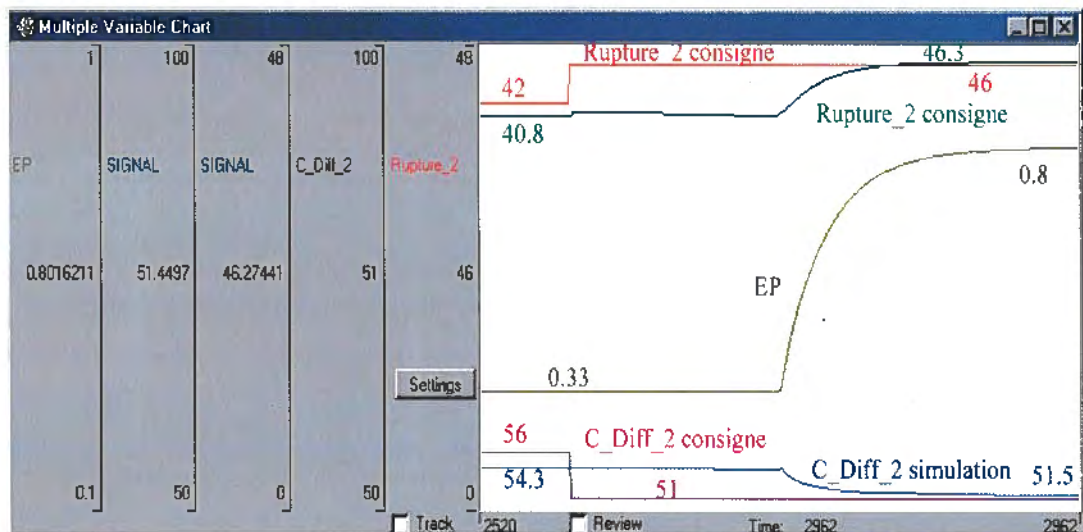


Figure 7.13 Réponse dynamique du contrôleur de Rupture_2+C_Diff_2 face à des changements séquentiels des deux consignes

7.4.1.2 Réponses à des changements simultanés

La figure 7.14 présente les réponses (composantes d'essence de bois et les résultats simulés des propriétés du papier) face à des changements simultanés de deux consignes, Rupture_2 de 48 à 40 et C_Diff_2 de 50 à 56.

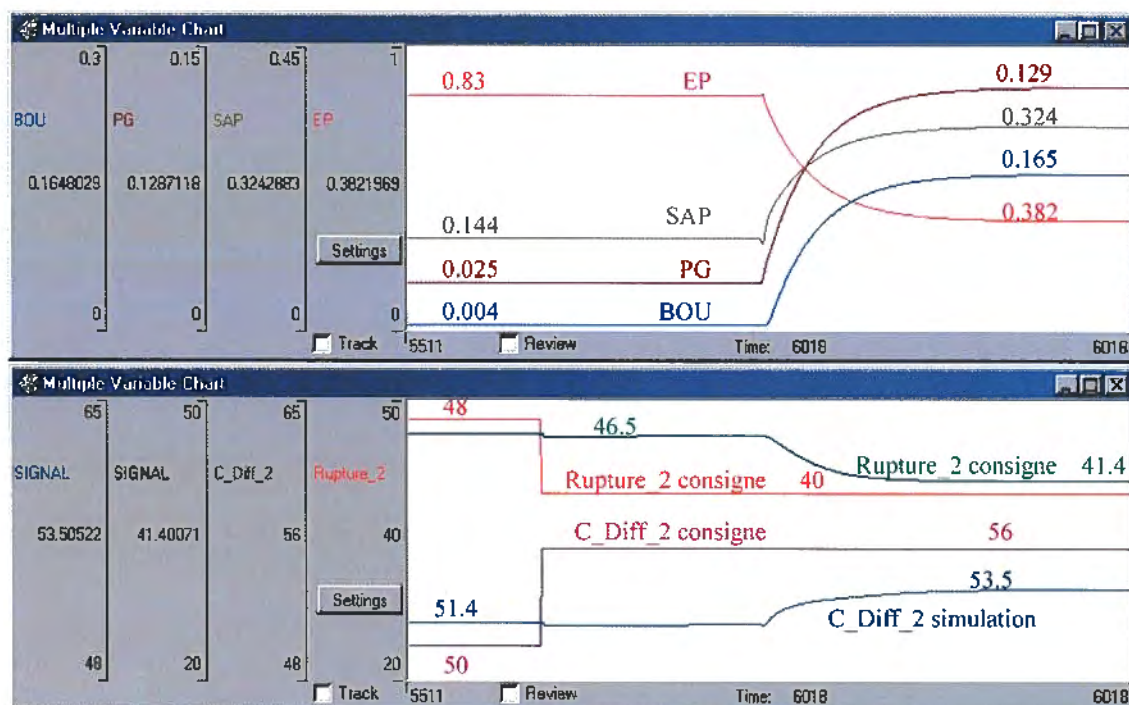


Figure 7.14 Réponses face à des changements simultanés des deux consignes Rupture_2 et C_Diff_2

On remarque que pour réduire Rupture_2 et augmenter C_Diff_2, les contrôleurs font augmenter le BOU et le SAP, tandis que l'EP est diminué. Le changement du PG est basé sur les variations des autres trois composantes de copeaux ($PG\% = 100\% - EP\% - SAP\% - BOU\%$). Avec cette action sur les copeaux les nouvelles consignes sont à l'intérieur de leur limite d'erreur spécifiée (erreur $\leq \pm 7\%$ pour Rupture_2 et erreur $\leq \pm 5\%$ pour C_Diff_2).

7.5 Avantages du contrôle du mélange des copeaux

La figure 7.15 présente le schéma final de la simulation développée jusqu'ici, incluant le contrôle par anticipation de Rupture_2 et C_Diff_2 par action sur les mélanges. Avec ce système, on peut premièrement contrôler les propriétés de pâtes par action sur les paramètres des raffineurs. On peut aussi contrôler les propriétés du papier par action sur les mélanges des 4 essences. Finalement, le contrôle simultané des matières premières

et du procédé permet une plus grande latitude face à des conséquences potentiellement contradictoires de certaines actions de contrôle. Par exemple, une alimentation de copeaux déjà le plus près possible de la longueur de fibre finale désirée permet d'atteindre simultanément LF_2 élevé et CSF_2 bas, malgré l'effet de coupe des fibres causée par l'utilisation possible d'énergie spécifique plus élevée.

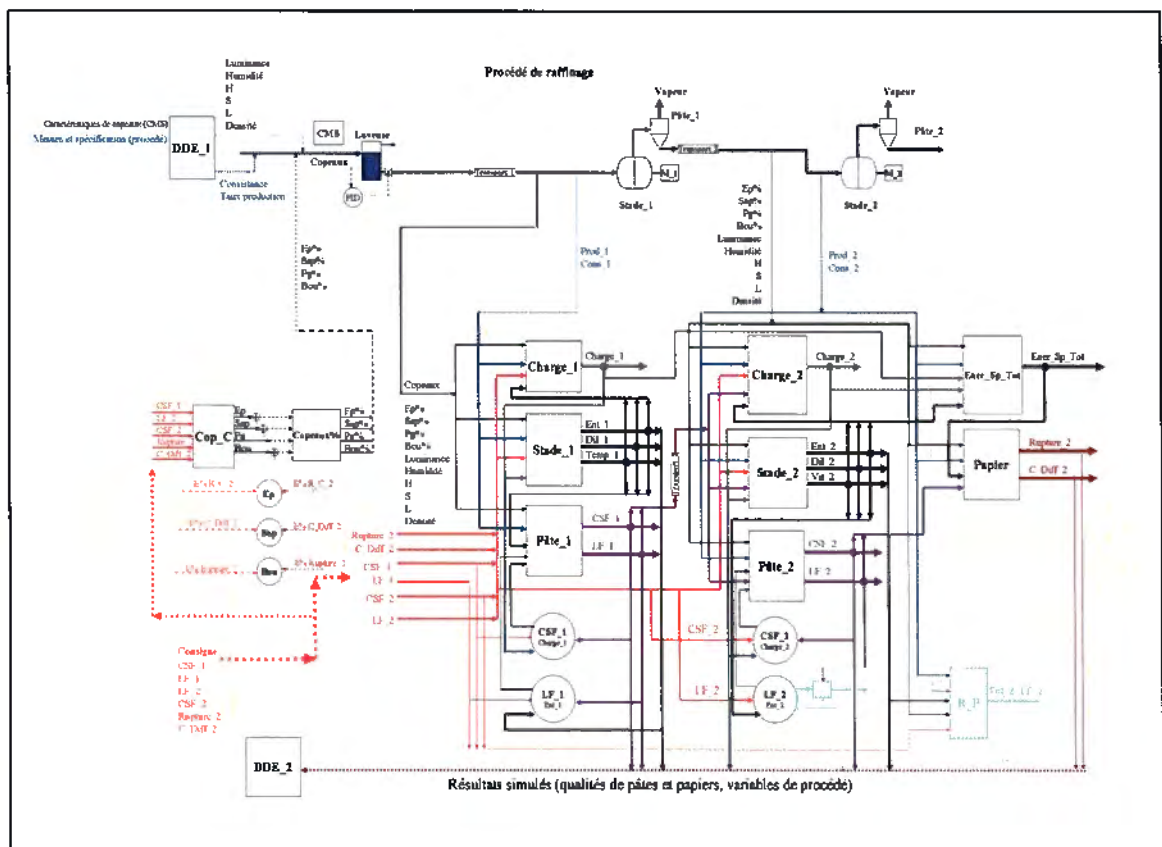


Figure 7.15 Schéma global des modèles CA avec la section du contrôle de copeaux

Le tableau 7.1 montre trois séries de résultats simulés. On compare les résultats entre un système avec et sans contrôle des mélanges. Dans ce tableau, les polices normales présentent les variables initiales et les polices italiques montrent les réponses. Pour chacun des trois groupes de résultats (I, II et III), la première ligne montre les entrées initiales pour les propriétés de copeaux et les consignes de qualités de pâtes et papiers désirées. La deuxième ligne présente les résultats après avoir ajusté seulement les

variables de procédé (sans contrôle de copeaux). La troisième ligne présente les résultats avec ajustement simultané du procédé et des mélanges.

Tableau 7-1 Résultats simulés sur le contrôle des copeaux

	EP	SAP	PG	BOU	Lumin	H	S	L	Humid	Dens	Ent_1	Di_1	Charge_1	Ent_2	Di_2	Charge_2	CSF_1	CSF_2	LF_2	Rup_2	C_Diff_2
I	0%	0%	50%	50%	52	22	109	52	49	0,45							413	200	1,28	20	52
											0,55	0,39	39,7	0,48	1680	27,6	413	199,9	1,22	17,9	50,2
	15%	0%	35%	50%	40	30	80	60	30	0,45	0,61	0,33	38,5	0,46	1136	31,1	413	199,8	1,27	20,5	51,9
II	15%	0%	35%	50%	40	30	80	60	30	0,45							413	200	1,28	25	50
											0,64	0,33	37,6	0,51	1285	30,5	416	199,5	1,28	22,8	48,3
	34%	0%	30%	36%	48	23	100	55	45	0,4	0,65	0,31	35,27	0,52	1365	29,3	410	199,8	1,29	24,5	50,6
III	34%	0%	30%	36%	48	23	100	55	45	0,4							413	150	1,22	30	56
											0,64	0,3	36,2	0,48	1458	32,6	408	149,5	1,25	26,3	52,1
	20%	36%	13%	31%	45	25	89	48	40	0,39	0,68	0,28	33,9	0,46	1296	34,5	411	150,2	1,23	30,8	55,7

Le premier groupe montre qu'après avoir entré les variables initiales des copeaux et les consignes de pâtes et papiers (première ligne du groupe I), les modèles inverses génèrent une série des variables de procédé, telles que Ent_1 = 0.61 mm, Ent_2 = 0.48 mm, Charge_2 = 27.6 kw, etc (seconde ligne du groupe I). Il existe à ce moment encore des erreurs entre les réponses obtenues et les consignes (seconde ligne du groupe I), par exemple, pour LF_2, on obtient 1.28 mm vs. 1.22 mm (erreur%=5%); pour Rupture_2 on obtient 20 vs. 18 (erreur % = (20 - 18) / 20 = 10 %); et C_Diff_2 52 versus 50 (erreur % = (52 - 50) / 52 = 3.8 %). Puisque les erreurs acceptables spécifiées par l'utilisateur pour cet exemple sont Rupture_2 ± 5% et C_Diff_2 ± 3%, on doit donc activer les contrôleurs de mélange. On voit que dans la ligne 3 du groupe I, les composantes de copeaux et les variables de procédé sont réajustées, et les erreurs sont donc réduites.

Dans le second groupe, les deux consignes de qualité du papier sont modifiées: Rupture_2 passe de 20 à 25 et C_Diff_2 passe de 52 à 50. On remarque que le système sans le contrôle donne d'assez bons résultats malgré des erreurs finales sur ces deux propriétés de papier (deuxième ligne du groupe II). En activant le contrôle des essences, les composantes de copeaux sont ajustées et les erreurs des propriétés de papier sont minimisées.

Dans le groupe III, on change toutes les consignes sur la qualité finale de la pâte et du papier: CSF_2 passe de 200 à 150mL, LF_2 passe de 1.3 à 1.2mm, Rupture_2 passe de 25 à 30 et C_Diff_2 passe de 50 à 56. À noter qu'on désire ici augmenter simultanément les 2 propriétés Rupture_2 et C_Diff_2. Sans le contrôle des essences (deuxième ligne du groupe III), l'absence de sapin devient problématique à l'atteinte de la nouvelle consigne de C_Diff_2. Avec le contrôle des essences (troisième ligne), le contrôleur de C_Diff_2 procède donc à l'ajout de SAP. Le contrôleur de Rupture_2 procède pour sa part à une diminution de BOU.

Chapitre 8 Économie d'énergie

Le système développé peut être employé pour optimiser le procédé [97]. Les deux chapitres précédents ont démontré que les CA avec les propriétés de copeaux permettent une réduction de la variabilité des propriétés de pâtes produites. Dans ce chapitre on explique comment exploiter ce résultat pour minimiser l'énergie spécifique utilisée par les raffineurs.

8.1 Relation entre énergie spécifique et CSF

En général, pour les mêmes propriétés de copeaux, la réduction du CSF de pâte signifie que la surface des fibres a subi un plus grand développement, par l'emploi de plus d'énergie spécifique. En examinant la figure 3.8, on trouve qu'il y a des relations négatives entre CSF_2 et Charge_2, CSF_2 et Ener_Tot. C'est à dire que l'augmentation de l'énergie fait réduire le CSF_2. L'équation 8-1 présente le calcul de l'énergie spécifique:

$$ES \text{ (énergie spécifique)} = P(\text{puissance}) / TP(\text{taux production}) = \frac{J/s}{kg/s} = J/kg$$

Équation 8.1

On voit donc qu'il y a deux façons de moduler ES: varier la puissance (numérateur) ou varier le taux de production (dénominateur).

En usine, on fixe généralement un CSF final de la pâte auquel on ajoute une variabilité acceptable pour la production du grade de papier concerné, par exemple 150 ± 5 mL (écart de 3.33 %). On utilise donc deux limites à l'intérieur desquelles le CSF final de pâte doit se retrouver: $CSF_{\max} = 150 + 150 * 3.33 \% = 155$ mL et $CSF_{\min} = 150 - 150 * 3.33 \% = 145$ mL.

8.1.1 Diminution de la charge

Considérons la figure 8.1. Supposons qu'avec le contrôle traditionnel, il y a un écart type de 3.33 % sur le CSF final autour d'une moyenne de 150 mL. Les limites du CSF final sont donc de 145 et 155mL, et la valeur de moyenne de la charge de moteur est dans ce cas 50 kw.

Avec le contrôle par anticipation, la principale source de variabilité du CSF, soit les variations des propriétés de copeaux, sont modélisées dans les entrées des modèles inverses et directs. Cette anticipation de la fluctuation des propriétés de copeaux diminue la variabilité de qualité de la pâte. Assumons qu'avec le CA, l'écart de CSF final est réduit à 2%. Alors, si la consigne de CSF est encore 150 mL, on obtient maintenant $CSF_{max} = 150 + 150 * 2\% = 153 \text{ mL}$, $CSF_{min} = 150 - 150 * 2\% = 147 \text{ mL}$. Dans ce cas, on peut donc diminuer la charge électrique pour augmenter la moyenne de CSF jusqu'à ce que la nouvelle variation ne dépasse pas la limite maximale (155mL). Ainsi, la valeur de la nouvelle moyenne du CSF est 152mL et la charge de moteur peut être ramenée à 49 kw. Autrement dit, avec le CA, on peut augmenter le CSF de 2 mL et réduire la puissance de 1 kw.

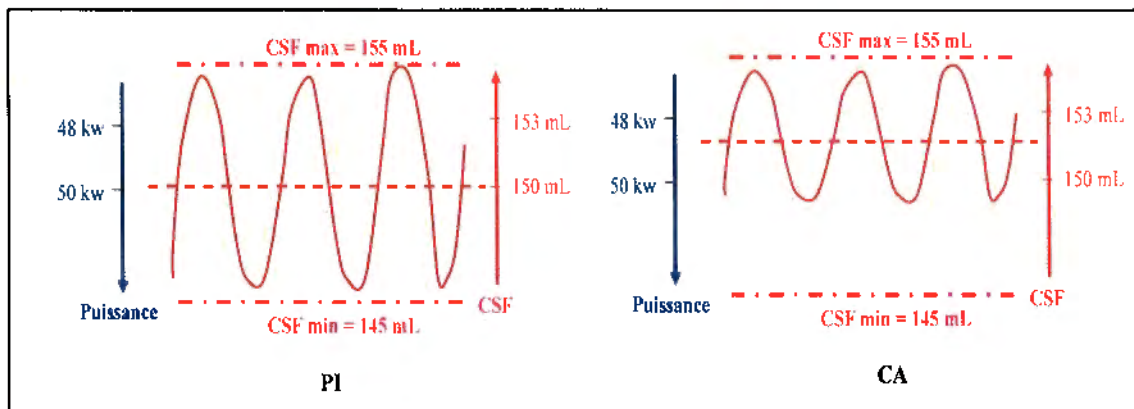


Figure 8.1 Diminution de la puissance électrique

8.1.2 Augmentation du taux de production

Pendant la production de la pâte, si on fixe la puissance de raffinage (numérateur de l'équation 8.1) et qu'on augmente le taux de production (dénominateur de l'équation

8.1), on obtient une autre façon d'exploiter l'augmentation de la moyenne du CSF rendue possible par la réduction de variabilité avec les CA.

La figure 8.2 montre la relation entre le taux de production et l'énergie spécifique. Supposons encore ici qu'avec le contrôle traditionnel, on peut produire une pâte de CSF final d'une moyenne de 150 mL avec un écart de 3.33 %. Le taux de production est de 0.4 kg/min et la valeur fixée de la charge de moteur est 50 kw, et donc $ES = 50 \cdot 60 / 0.4 = 7500 \text{ kJ / kg}$.

Supposons qu'avec le CA l'écart de CSF final est de 2%, donc que $CSF_{max} = 153 \text{ mL}$. On peut donc augmenter le taux de production (cela fait diminuer l'énergie spécifique), jusqu'à ce que la nouvelle variation ne dépasse pas la limite maximale (155mL). Ainsi, la valeur de la nouvelle moyenne du CSF est 152mL et le taux de production peut être augmenté à 0.42kg/min. Quand le taux de production augmente à 0.42 kg / min, l'énergie spécifique est du même coup réduite à 7143 kJ / kg.

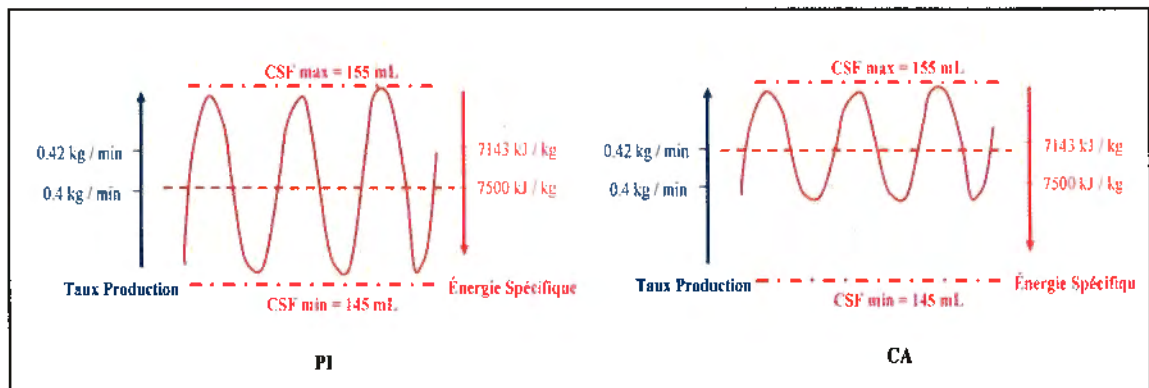


Figure 8.2 Augmentation de taux de production

Il faut noter que l'augmentation du taux de production ou la diminution de la charge ne peuvent pas dépasser les limites maximales du raffineur. De plus, les propriétés de papier telles que l'indice de rupture et le coefficient de diffusion peuvent être affectés négativement.

8.2 Méthode de calcul

8.2.1 Coût de référence

Nous utilisons les données d'une usine pour obtenir un tarif réaliste. Prenons un moteur de 8000HP, la puissance égale $8000\text{HP} \times 746\text{w/HP} = 5.968 \text{ Mw}$. Pour une journée de raffinage, $5.968 \text{ Mw} \times 24 \text{ heures} = 143 \text{ Mwh}$. Les données de l'usine montrent une consommation de 135 Mwh, donc ce raffineur fonctionne juste un peu en dessous de sa puissance maximale. Selon les facturations, on estime qu'il en coûte 0.04\$ pour 1 Kwh.

8.2.2 Paramètres impliqués dans le calcul des coûts électriques

Nous donnons ici les paramètres et calculs impliqués dans les intégrales des 2 sections suivantes.

Taux de production:

$$\text{Prod_1} = M \text{ kg/s}$$

Charge totale :

$$\text{Charge_1} + \text{Charge_2} = N \text{ kw} = N \text{ kJ/s.}$$

Avec ces deux intrants, on peut calculer l'énergie spécifique totale par kilogramme:

$$\text{Énergie_Spécifique_1 (kJ/kg)} = (N \text{ kJ/s}) / (M \text{ kg/s}) = N / M \text{ (kJ/kg)} \quad \text{Équation 8.2}$$

ou par tonne :

$$\text{Énergie_Spécifique_1 (MJ / T)} = N / M \text{ (kJ/kg)} * 0.001 \text{ MJ / kJ} * 1000 \text{ kg/T} = N / M \text{ (MJ / T)} \quad \text{Équation 8.3}$$

Le temps « t » pour produire une tonne est alors:

$$\Delta t \text{ (sec)} = 1000\text{kg} / M \text{ kg/s} = 1000 / M \text{ sec}$$

$$\Delta t \text{ (h)} = 1000 / (M * 3600) \text{ heure}$$

Le coût pour 1 kwh = P \$ / kwh.

8.2.2.1 Calcul basé sur l'intégrale de la charge de moteur

Pour produire une tonne de pâte, le coût d'énergie est :

$$\int_0^{\Delta T} N \text{ (kwh)} dt * P \text{ (\$/kwh)} = N' * \Delta t * P = N' * P * 1000 / M / 3600 (\$/T)$$

Équation 8.4

où:

N' : la moyenne de la charge de moteur pendant Δt .

Par exemple, à l'usine pilote du CIPP, le taux de production des raffineurs est :

$$M = 0.01 \text{ kg/s}$$

La puissance totale des deux stades (charge_1 + charge_2) est :

$$N = 80 \text{ kw} = 80 \text{ kJ/s}$$

Pour produire une tonne de la pâte :

$$\Delta t = 1000 / M / 3600 = 27.78 \text{ heures}$$

D'après l'équation 8.4, en utilisant un tarif de 0.04\$ / Kwh, on obtient :

$$\text{coût par tonne} = 80 * 27.78 * 0.04 = 88.89 \text{ \$/T.}$$

8.2.2.2 Calcul basé sur l'intégrale de l'énergie spécifique

Pendant Δt la moyenne d'énergie spécifique égale :

$$MES = [\int_0^{\Delta T} E_2 \text{ (MJ/T)} dt] / \Delta t \text{ (MJ/T)}$$

$$= \{ \int_0^{\Delta T} (N / M) dt \} / \Delta t \text{ (MJ/T)}$$

$$= N' / M \text{ (MJ/T)}$$

Équation 8.5

Calculer le coût électrique en kJ :

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s};$$

$$P' = P \text{ (\$/kw} * 3600\text{s)} = P / 3600 \text{ (\$/kJ)}$$

$$\text{Le coût d'énergie} = 1000 * N' / M * P / 3600 \text{ (\$/T)}$$

Équation 8.6

Par exemple: $M = 0.01 \text{ kg/s}$; $N = 80 \text{ kw} = 80 \text{ kJ/s}$; le coût unité = $0.04 \text{ \$ / kwh}$.

D'après équation 8.6 :

$$\text{MES} = 80 / 0.01 = 8000 \text{ (kJ / kg)} = 8000 \text{ (MJ/T)}$$

$$\text{Le coût par tonne} = 1000 * 8000 * 0.04 / 3600 = 88.89 \text{ \$/T}$$

On constate que le résultat est le même que celui obtenu avec l'autre méthode.

8.2.3 Implantation du calcul dans Cadsim Plus

La figure 8.3 présente le principe du calcul du coût de la charge électrique avec les modèles de Cadsim Plus. La méthode de la section 8.2.2.2 est utilisée.

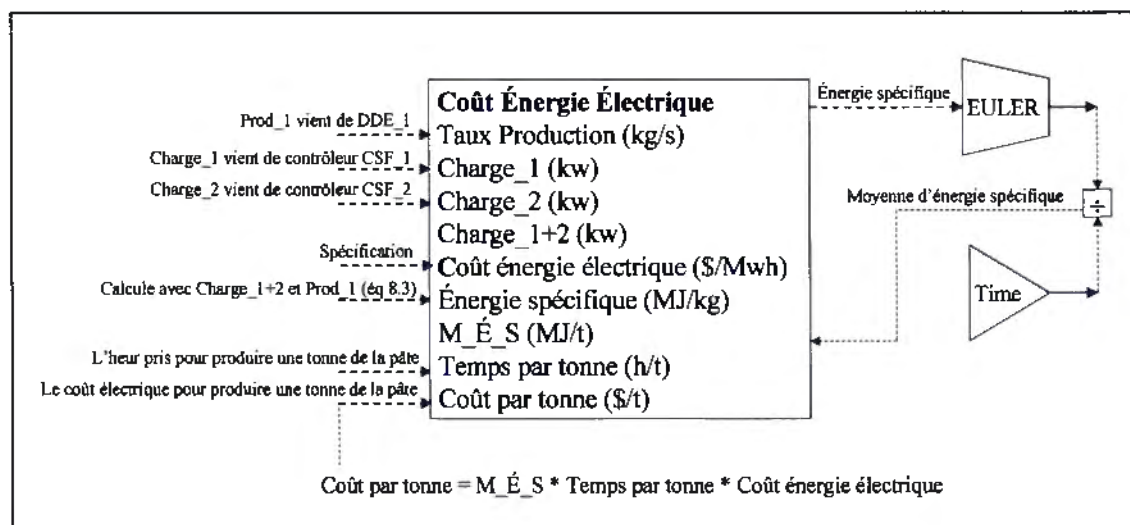


Figure 8.3 Calcul du coût électrique dans Cadsim Plus

On voit que dans la boîte Coût Énergie Électrique, il y a 9 variables. Parmi elles, les valeurs de Taux Production, Charge_1 et Charge_2 proviennent directement des modèles de deux stades (chapitre 4). D'après l'équation 8.1 on peut calculer :

$$\text{Énergie Spécifique Totale} = (\text{Charge}_1 + \text{Charge}_2) / \text{Taux Production}$$

Équation 8.7

Avec l'intégrateur EULER (module d'intégration par la méthode d'Euler dans Cadsim Plus), la valeur de l'énergie spécifique totale est intégrée avec le temps. La sortie de EULER est ensuite divisée par le temps généré par le modèle de TIME. On obtient donc la moyenne de l'énergie spécifique totale. La variable Coût Énergie (\$ / Mwh) est spécifiée par l'utilisateur. Le calcul du coût électrique final par tonne (\$ / T) est tiré de l'équation 8.6.

8.3 Réduction des coûts de production

Si on préconise d'exploiter la réduction de variabilité du CSF par une réduction de la puissance, ceci devrait permettre une réduction des coûts de production. On a fait une série de tests pour comparer le coût électrique entre le CA et le contrôle PI. Le tarif utilisé est de 0.04\$/kwh. Le tableau 8-1 montre trois groupes de résultat sur ces deux types de contrôleurs. Dans chaque groupe, la première ligne présente les données d'entrées initiales, incluant les propriétés de copeaux, les variables de procédé mesurées et les deux consignes CSF_1 et CSF_2. La seconde ligne (en italique) montre le résultat calculé par le PI et la troisième ligne (en italique également) montre le résultat calculé par le CA. Les deux dernières colonnes montrent les coûts énergétiques pour les deux types de contrôles avec comparaison entre eux. On remarque que le CA permet des économies de l'ordre de 6 à 12 % par rapport au contrôle ordinaire PI. Un autre avantage important réside dans la meilleure uniformité de la qualité des pâtes produites.

Tableau 8-1 Comparaison du coût électrique entre CA et PI

	EP	SAP	PG	BOU	Lumin	H	S	L	Humid	Dens	Cons. 1	Prod. 1	Charge 1	Charge 2	CSF_1	CSF_2	\$/T	EC%
	0%	20%	40%	40%	52	22	109	52	49	0.45	25	0.55	31	48	413	157		
1	PI												31	49	405	157.2	97	
	CA												29	41	410	161	85	12.4%
	100%	0%	0%	0%	51	22	103	51	49	0.38	22	0.39	25.3	46	582	167		
2	PI												26.1	47	568	166.8	122	
	CA												23.8	42	562	170.6	113	6.5%
	0%	100%	0%	0%	57	22	99	57	49	0.33	21	0.51	26.4	36	466	161		
3	PI												26.4	36.1	460	160	80	
	CA												24.3	34.5	463	163	75	6.3%

où :

$$EC\% (\text{économie } \%) = [PI(\$ / T) - CA(\$ / T)] / PI(\$ / T).$$

Un premier fait important à noter est que l'erreur sur le CSF_2 obtenu du CA semble plus grande qu'avec le PI. En pratique la valeur de CSF_2 dans le tableau 8-1 est une moyenne (figure 8.1). La réduction de variabilité rendue possible par ce type de contrôleur fait en sorte que le CSF_2 peut s'approcher plus près de la valeur maximale de la limite spécifiée. Cela donne l'illusion d'une déviation entre la moyenne de CSF_2 obtenu du CA et la consigne, ce qui n'est bien sûr pas le cas.

La moyenne d'économie pour chaque tonne de pâte produite pour ces trois groupes est de 8.4 %. D'après les relations entre l'augmentation de la moyenne du CSF_2 rendue possible par réduction de la variabilité et le pourcentage d'économie EC% résultant pour chaque tonne de pâte, on peut dire qu'une augmentation de 1 % de la moyenne du CSF final fait économiser environ 3 % la tonne.

Les trois sections suivantes expliquent plus en détail les comparaisons entre CA et PI sur CSF_2, Charge_2 et le coût électrique par tonne de pâte produite pour les trois blocs dans le tableau 8-1.

8.3.1 Analyse du premier bloc

La figure 8.4 présente la comparaison entre CA et PI du second stade avec un mélange sans EP.

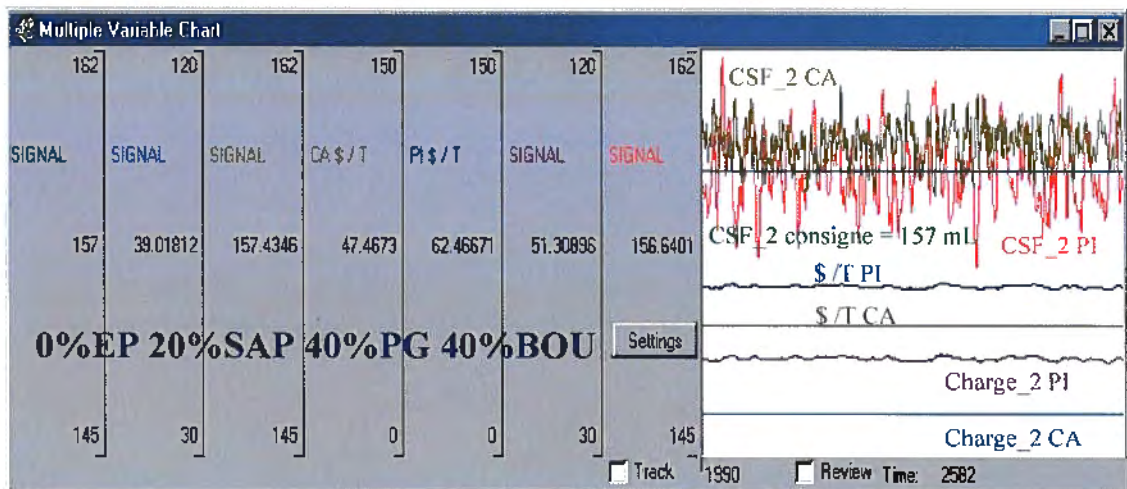


Figure 8.4 Comparaison de charge_2, CSF_2, \$/T entre PI et CA (0%EP, 20%SAP, 40%PG, 40%BOU)

On voit qu'avec la même consigne du CSF_2 de 157mL, la variabilité du CSF_2 du CA est plus faible et plus stable qu'avec le PI. La moyenne de CSF_2 du CA peut donc s'approcher plus près de la limite maximale (dans cet exemple, la limite désirée avec erreur spécifiée de 3% est 157 ± 4.7 mL, la limite maximale est donc 161.7mL). La moyenne de la Charge_2 pour CA égale 40.8kw, pour PI elle est de 49.6kw. Avec les équations 8.1 à 8.6 et leur implantation dans la simulation (figure 8.4), on peut calculer le coût électrique par tonne de pâte. L'économie par tonne produite est calculée comme suit.

Avec un taux de production de 0.55 kg / min (tableau 8-1), pour produire 1 tonne de pâte, on a besoin de $1000 \text{ kg} / (0.55 \text{ kg} / \text{min}) = 1818.2 \text{ min} = 30.3 \text{ heures}$. Pour le contrôleur PI du stade_2, $49 \text{ kw} * 30.3 \text{ h} = 1484.9 \text{ kwh}$ par tonne. Si 1 kwh = 0.04 \$, alors avec PI on tire $1484.9 * 0.04 = 59.4 \text{ \$} / \text{T}$.

Pour le CA du stade_2, $41 \text{ kw} * 30.3 \text{ h/T} = 1242.3 \text{ kwh/T} * 0.04 \text{ \$/kwh} = 49.7 \text{ \$ / T}$, soit une économie de 9.7 \$ pour le stade_2. Le tableau 8.1 montre pour sa part les économies combinées des 2 stades.

8.3.2 Analyse du second bloc

La figure 8.5 présente la comparaison entre CA et PI du stade_2 avec un mélange 100% EP.

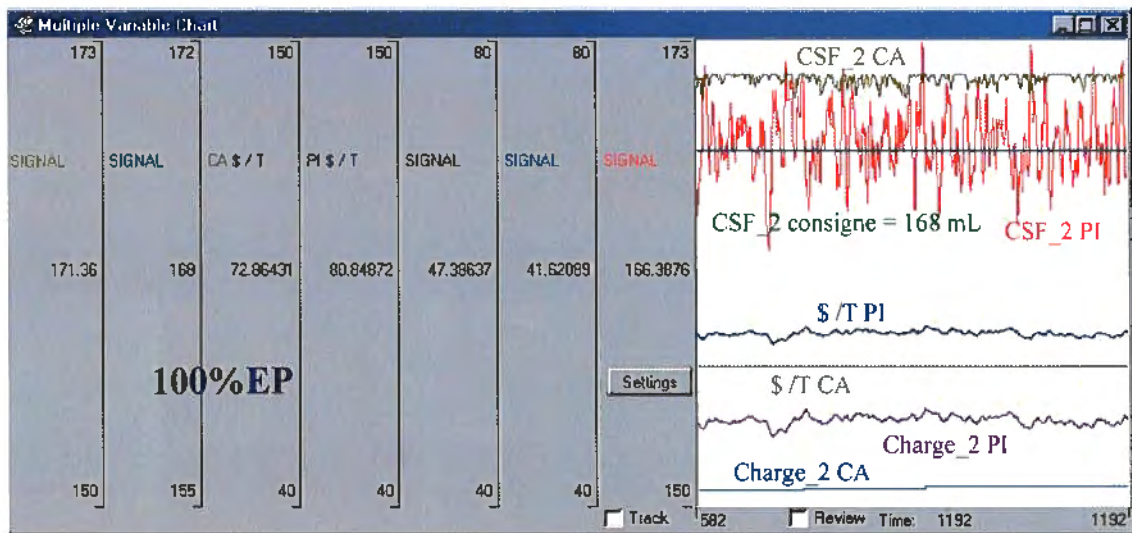


Figure 8.5 Comparaison de charge_2, CSF_2, \$/T entre PI et CA (100%EP)

La consigne de CSF_2 est de $168 \pm 4 \text{ mL}$ et la moyenne de CSF_2 du CA atteint 171mL, très près de la limite maximale de 172 mL. La moyenne de la Charge_2 de CA est aussi plus stable, elle atteint 47.2 kw avec PI et 41.6 kw avec CA.

Avec la même méthode de calcul que précédemment, on conclut que pour produire une tonne de la pâte de 100%EP, pour PI, le coût électrique au stade_2 est $47 \text{ kw} * 42.7 \text{ h/T} * 0.04 \text{ \$/kwh} = 80.3 \text{ \$/T}$; pour CA ce coût est réduit à 71.7\$/T ; donc 8.6\$ d'économie par tonne.

8.3.3 Analyse du troisième bloc

La figure 8.6 présente la comparaison entre CA et PI du stade_2 avec un mélange 100% SAP. La consigne de CSF_2 est $161 \pm 3 \text{ mL}$, la moyenne possible avec le CA est 163 mL , et avec le PI elle est de 161 mL . Charge_2 de CA est de 34.5 kW (36.1 kW pour PI). Le coût électrique par tonne de pâte pour $\text{CA} = 45 \text{ \$ / T}$, pour $\text{PI} = 47.2 \text{ \$ / T}$, soit une économie de $2.2 \text{ \$ / T}$.

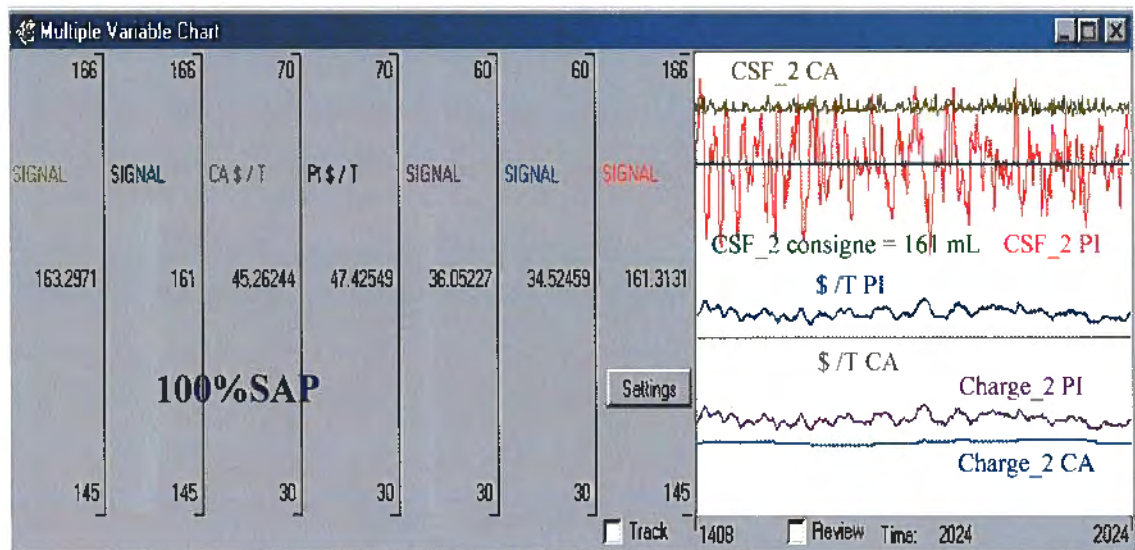


Figure 8.6 Comparaison de charge_2, CSF_2, \$/T entre PI et CA (100%SAP)

On remarque que parmi les trois essais aux figures 8.4 à 8.6, la variabilité du CSF_2 dans la figure 8.4 est la plus grande. En se référant à la section 3.4, on remarque que parmi les quatre essences du bois, l'influence du PG est la plus significative sur le CSF. Or seul le premier bloc faisait utilisation de PG, d'où la variabilité accentuée. Pendant l'opération, à cause des structures différentes des fibres, les composantes différentes du bois exigent des énergies différentes, le coût électrique est donc différent. Alors pour chaque mélange, l'économie n'est pas la même.

8.4 Augmentation du profit

Si on privilégie plutôt d'exploiter la réduction de variabilité du CSF par une augmentation du taux de production, ceci devrait permettre une augmentation des profits.

Supposons une consigne de CSF_2 de 160 ± 5 mL. La limite supérieure est CSF_2max = 165. Si avec le contrôle de PI, on a une variabilité de ± 4 mL, il faut donc utiliser une moyenne de 161 mL pour ne pas dépasser les 165 mL.

Si maintenant avec le CA on a une réduction de variabilité à ± 2 mL, alors on peut donc utiliser une moyenne de 163 mL au lieu de 161 mL. On peut donc réduire l'énergie spécifique (équation 8.1) en augmentant le taux de production.

Si une tonne de pâte vaut 550\$ [98, 99, 100], alors une augmentation du taux de production devrait augmenter les profits de la pâte vendue.

Le tableau 8-2 montre trois exemples où on privilégie plutôt d'exploiter la réduction de variabilité du CSF_2 en une augmentation du taux de production. La première ligne de chaque groupe provient de la base de données. Cette ligne présente les variables initiales de copeaux, les variables de procédé, les variables mesurées et les consignes de CSF pour les deux stades. La ligne suivante (en italique) montre les résultats simulés générés par le contrôle traditionnel PI avec le taux de production Prod_2 initial. La troisième ligne présente les résultats de simulation générés par le CA pour ce même taux de production initial Prod_2. La quatrième ligne montre l'augmentation du taux de production rendue possible par la réduction de la variabilité obtenue du CA.

L'avant dernière colonne présente un prix de vente fixé à 550\$ /T. La dernière colonne montre le profit supplémentaire (PR\$/min) rendu possible par le CA, il est calculée par l'équation suivante:

$$\text{PR (\$/min)} = (\text{Prod}_2 \text{ augmenté} - \text{Prod}_2 \text{ initial}) * \text{valeur de pâte par tonne}$$

Équation 8.8

La moyenne d'augmentation du profit pour ces trois groupes est de 12.4 %. D'après les relations entre l'augmentation de la moyenne du CSF_2 (ici $\Delta\text{CSF}_2 = 3.1$) rendue possible par réduction de la variabilité et le profit supplémentaire PR \$/min qui peut en résulter, on peut dire qu'une augmentation de 1 % de la moyenne du CSF final fait augmenter le profit à un taux de $(0.044+0.024+0.033)/(3*3.1)=0.011\$/\text{min}$.

Tableau 8-2 Comparaison du profit par augmentation du taux de production

	EP	SAP	PG	BOU	Lumin	H	S	L	Humid	Dens	Cons_1	Prod_2	Charge_1	Charge_2	CSF_1	CSF_2	\$/T PR\$/min
	0	0.2	0.4	0.4	52	22	109	52	49	0.45	25	0.55	31.0	48.0	413	157	550
PI												0.55	31.0	49.0	409	157.2	550
I																	
CA												0.55	29.0	41.0	410	157.6	550
												0.63	29.0	41.0	416	160	550
																	0.044
	1	0	0	0	51	22	103	51	49	0.38	22	0.40	25.3	46.0	582	167	550
PI												0.40	26.1	47.0	581	167.7	550
II																	
CA												0.40	23.8	42.0	580	167.2	550
												0.45	23.8	42.0	595	170.8	550
																	0.024
	0	1	0	0	57	22	99	57	49	0.33	21	0.51	26.4	36.0	466	161	550
PI												0.51	26.0	36.3	460	160.7	550
III																	
CA												0.51	24.3	34.5	463	161.5	550
												0.57	24.3	34.5	472	163.6	550
																	0.033

8.4.1 Analyse du premier bloc

La figure 8.7 montre la comparaison de l'augmentation du taux de production (et donc des profits) entre CA et PI, avec des composantes de copeaux 0% EP, 20%SAP, 40%PG, 40% BOU. La consigne de $\text{CSF}_2 = 157 \pm 4$ mL.

Le taux de production initial Prod_2 est fixé à 0.55 kg/min. Pour le PI, avec une Charge_2 fixée à 49.6 kw, on peut obtenir un CSF_2 entre les deux limites de 153 à 161mL. Si on augmente Prod_2, le CSF_2 dépasse la limite maximale de 161 mL.

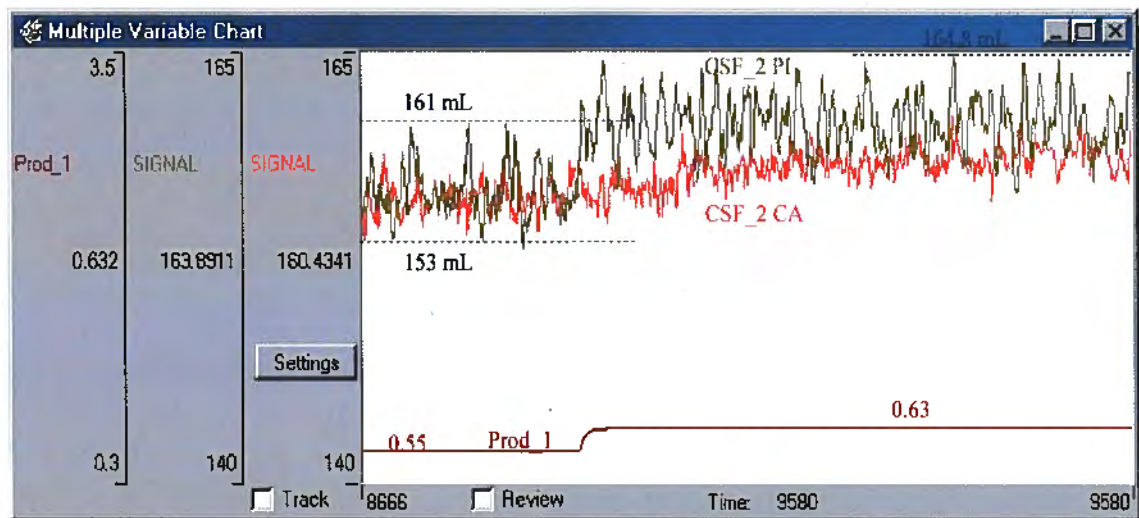


Figure 8.7 Comparaison de CSF_2 entre PI et CA après augmentation du taux de production (0% EP, 20% SAP, 40% PG, 40% BOU)

Avec le modèle de CA, au même taux de production de 0.55 kg/min, une première constatation intéressante est qu'une Charge_2 de seulement 41 kw permet une variation du CSF_2 de 153.6 à 158.2 mL (figure 8.7). On a donc déjà ici implicitement une réduction des coûts énergétiques et une réduction de la variabilité.

Maintenant, quand on augmente le Prod_2 de 0.55 à 0.63 kg/min, le CSF_2 varie entre 156.8 et 160.9 mL (on est donc très près de la limite maximale de 161mL à ne pas dépasser). La production supplémentaire est de $(0.63-0.55)/0.55 = 0.145$, soit 14.5% de plus. Au prix de 550\$/T, on augmente donc les profits de $(0.63-0.55)\text{kg/min} \times 0,550\$/\text{kg} = 0,044\$/\text{min}$.

8.4.2 Analyse du second bloc

On utilise ici 100% EP avec une consigne de $\text{CSF}_2 = 167 \pm 5\text{mL}$. Le taux de production initial Prod_2 est fixé à 0.4 kg/min. Pour le PI, avec Charge_2 = 47 kw, on peut obtenir un CSF_2 entre les deux limites de 164 à 172 mL. Avec le CA, un taux de production de 0.4 kg/min et une Charge_2 de 42 kw donnent une variation du CSF_2 de 165.2 à 168.5 mL. On peut donc augmenter Prod_2 pour s'approcher de la limite de 172mL.

Une augmentation à 0.45kg/min donne une variation de 168.2 à 171.8 mL. La production supplémentaire est de $(0.45-0.40)/0.40 = 0.125$, soit 12.5% de plus. Le profit potentiel est donc de $(0.45-0.4)*0.550 = 0.024\$/\text{min}$.

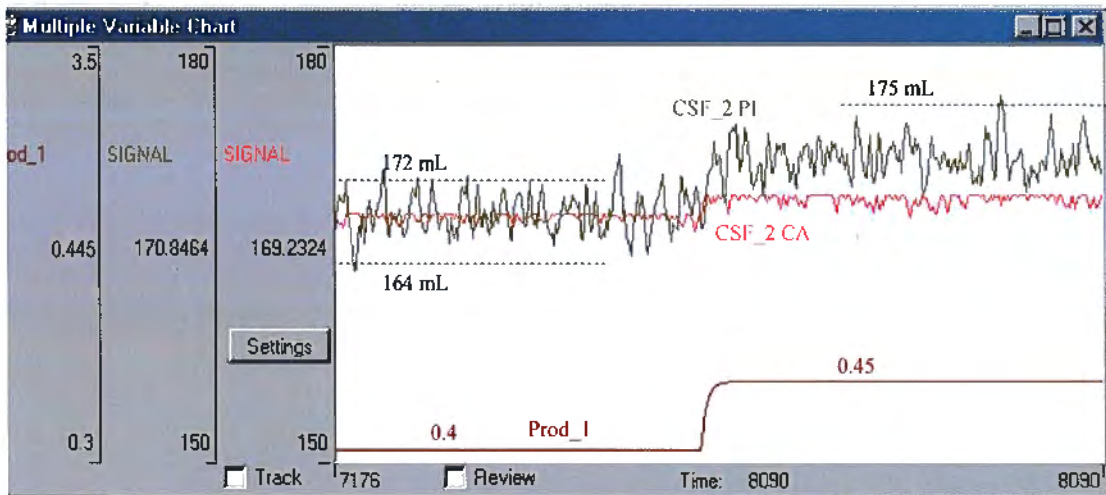


Figure 8.8 Comparaison de CSF_2 entre PI et CA après augmentation du taux de production (100% EP)

8.4.3 Analyse du troisième bloc

On utilise finalement 100% SAP avec une consigne de $\text{CSF}_2 = 161 \pm 4 \text{ mL}$. Le taux de production initial Prod_2 est fixé à 0.51 kg/min. Pour le PI, avec $\text{Charge}_2 = 36.3 \text{ kW}$, on peut obtenir un CSF_2 entre les deux limites de 157 à 165 mL. Avec le CA, on peut augmenter Prod_2 à 0.57kg/min, ce qui donne une variation de 162.3 à 164.9 mL. La production supplémentaire est de $(0.57-0.51)/0.51 = 0.118$, soit 11.8% de plus. Le profit potentiel est donc de $(0.57-0.51)*0.550 = 0.033\$/\text{min}$.

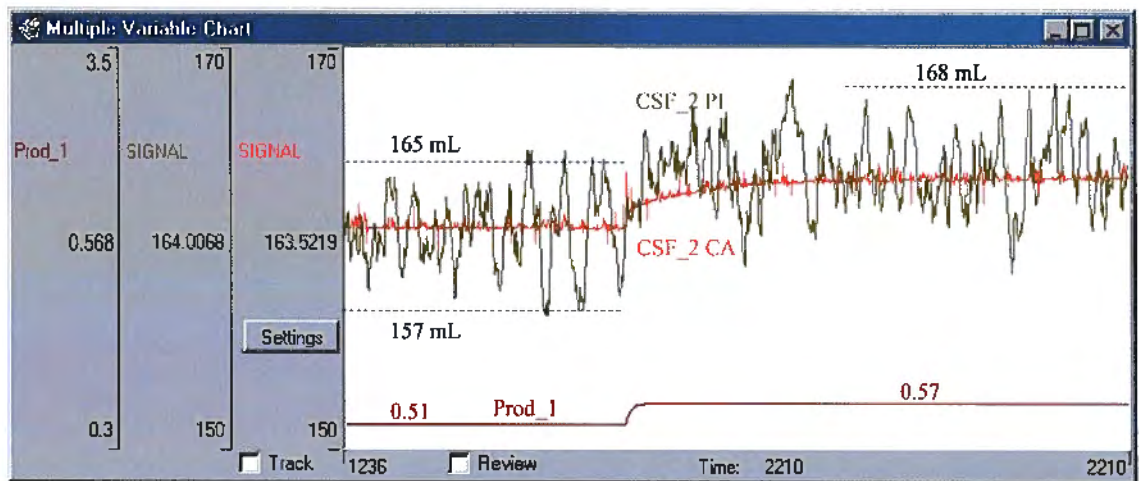


Figure 8.9 Comparaison de CSF_2 entre PI et CA après augmentation du taux de production (100% SAP)

Bien que l'augmentation du taux de production nous fasse obtenir des taux différents d'augmentation du profit, il faut faire attention à ce que cela n'affecte pas négativement d'autres paramètres de qualité (autres que CSF_2). De plus, il faut considérer aussi le rendement normal du raffineur.

Chapitre 9 Conclusions

9.1 Résultats importants

9.1.1 Analyse PLS

Les résultats des analyses PLS ont permis de découvrir les relations essentielles entre les trois groupes de variables du procédé multivariables PTM: les propriétés de copeaux, les variables manipulées du procédé et les qualités de pâtes et papiers. Les résultats analytiques montrent clairement que les composantes d'essence du bois et les caractéristiques de copeaux affectent significativement la qualité des pâtes et papiers.

Un résultat d'importance pratique pour l'industrie concerne l'influence des propriétés de copeaux (figure 9.1) captées par le CMS. Ce système possède la capacité de mesurer dynamiquement les variations des caractéristiques des copeaux. En l'intégrant dans un contrôleur de type CA, on peut réagir aux variations de qualité de pâtes créées par les perturbations des propriétés de copeaux, et ainsi uniformiser la qualité de la production.

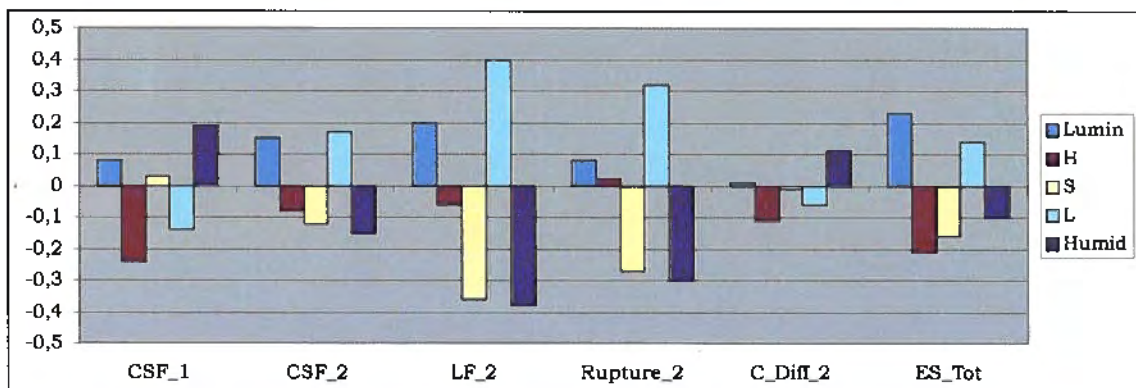


Figure 9.1 Relation entre les caractéristiques de copeaux et les qualités de pâtes

où :

ES_Tot : énergie spécifique totale.

9.1.2 Modélisation RDN

Les divers RDN développés dans cette recherche ont permis de modéliser le procédé PTM multivariables. Quatre groupes de RDN ont été développés : modèles du stade 1, modèles du stade 2, modèles des propriétés du papier, et modèles de mélange des copeaux.

Une caractéristique importante est que l'on a dû diviser ces modèles en deux types : modèles directs et modèles inverses. Comme leur nom l'indique, les modèles directs permettent de prédire directement les propriétés des pâtes et papiers. Les modèles inverses jouent pour leur part deux rôles essentiels. Premièrement, ils permettent d'anticiper les variables manipulées du procédé qui satisfont les consignes de qualité des pâtes. Deuxièmement, ils anticipent ces variables manipulées à partir des variations des propriétés de copeaux, avant même qu'ils n'entrent le raffineur. Dans ce cas les perturbations des copeaux peuvent être compensées efficacement, et la variation de qualité de pâte peut être diminuée.

9.1.3 Modélisation dynamique

Les RDN sont statiques. Le procédé PTM est dynamique. Le logiciel Cadsim Plus possède la capacité de simuler un procédé dynamique avec réalisme. Dans cette recherche, on a réussi à coupler les modèles RDN avec le modèle dynamique. Les nombreux résultats de simulation sont donc plus près des valeurs de la base de données expérimentales, puisque ces dernières comportent inévitablement des effets dynamiques. Les modèles sont donc plus crédibles et on peut faire beaucoup plus d'expériences en simulation. Comparativement aux essais en laboratoire, les résultats de simulation font sauver temps et argent.

9.1.4 Contrôle des raffineurs

Les résultats de simulation montrent que les divers modèles, lorsqu'ils sont utilisés dans une stratégie de contrôle par anticipation des raffineurs, amènent une réduction de la variabilité du CSF comparativement à un contrôle conventionnel PI sans modélisation des copeaux.

Ce résultat est d'une grande importance pratique pour deux raisons. Premièrement, la réduction de variabilité signifie une production de qualité plus uniforme, laquelle est devenu un standard très important. Malgré que la science papetière a fait beaucoup de progrès, l'uniformité de la qualité de papier requise est sans cesse croissante, ce qui amène les usines à améliorer et optimiser continuellement leur procédé de production.

Deuxièmement, cette réduction de variabilité peut être exploitée pour diminuer les coûts de production ou encore augmenter le taux de production. La figure 9.2 présente la relation entre CSF et énergie spécifique (augmentation de l'énergie spécifique qui fait diminuer le CSF). La figure 9.3 montre que la réduction de variabilité du CSF permet de diminuer l'énergie spécifique, donc de diminuer la puissance ou augmenter le taux de production (d'après l'équation 8.1).

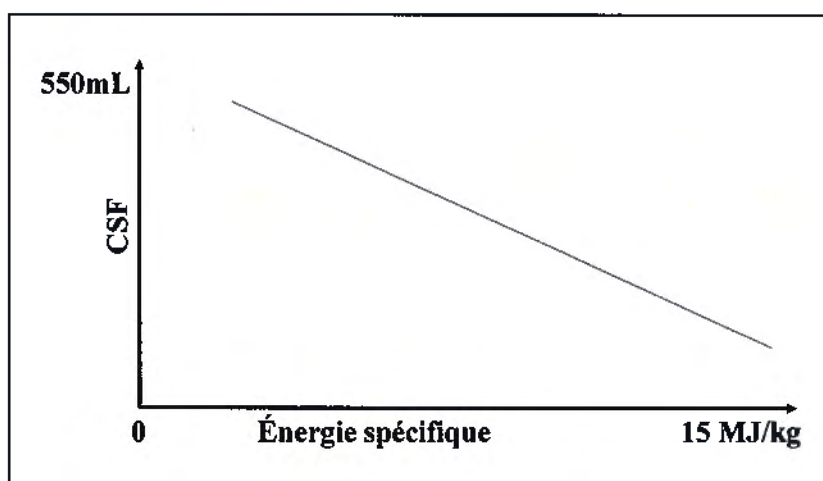


Figure 9.2 Relation entre énergie spécifique et CSF

Les résultats de cette recherche en pilote montrent qu'une augmentation de 1% du CSF final amène une économie d'énergie de 3% (diminution de la puissance) ou un profit de 4.8% (augmentation du taux de production).

Prenons l'exemple de deux lignes de raffinage d'une usine dont la charge totale est de 35.6 MW, pour un rendement quotidien de 500T/jour. Assumons un coût de 0.04\$/kWh et un prix de revient de 550\$/tonne de pâte. Avec ces données, cette usine pourrait donc économiser 1035\$ par jour en coût énergétique, ou encore augmenter son profit de 13200\$ par jour de production.

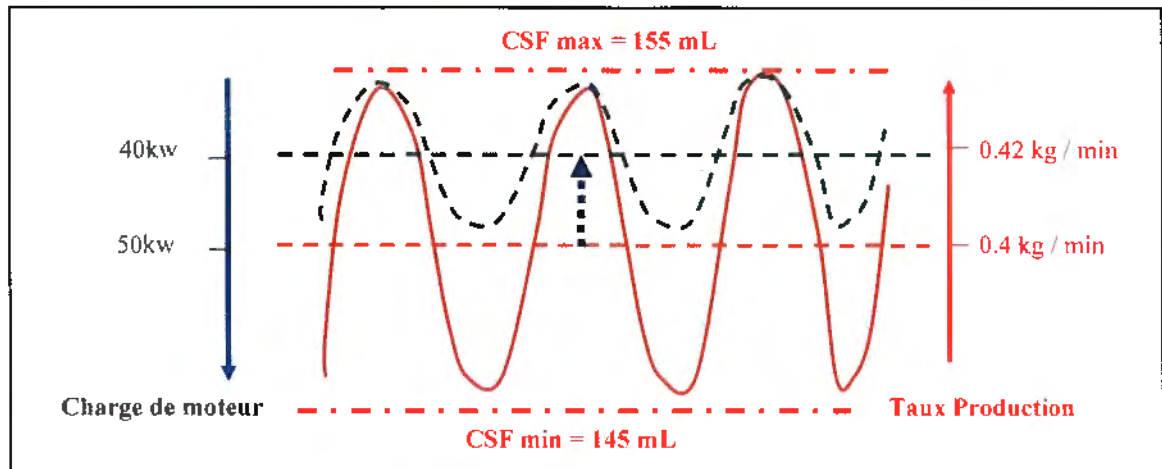


Figure 9.3 Relation entre l'énergie spécifique et le CSF

9.1.5 Contrôle des essences

Certains bénéfices du contrôle par anticipation des raffineurs sont limités par le fait que d'autres variables tout aussi importantes que le CSF peuvent être affectées négativement par la réduction de l'énergie spécifique rendue possible par la réduction de variabilité du CSF. Par exemple, tout dépendant des essences utilisées, une augmentation du taux de production peut faire baisser l'indice de rupture et/ou le coefficient de diffusion.

Dans cette recherche, l'utilisation d'un modèle de copeaux dans un contrôleur des essences permet de conserver la qualité des pâtes et papiers avec l'augmentation du taux de production. De plus, lorsqu'utilisé dans une boucle de contrôle, le modèle de copeaux peut anticiper les composantes d'essence du bois nécessaires à l'atteinte des consignes. Ceci facilite le travail du contrôleur et il devient plus facile de trouver une combinaison effective des variables manipulées.

Une implantation réelle en usine du contrôle des essences implique des considérations physiques. Il faut premièrement un appareil CMS. Dépendant du grade de papier à fabriquer et des changements de consignes qui en résultent, il faut aussi faire des essais de mélanges de composantes différentes des copeaux pour trouver les nouvelles combinaisons entre les nouvelles consignes et les variables manipulées. L'utilisation de ces modèles permet de réaliser la stratégie de contrôle des composantes de copeaux, à

condition bien sûr que l'équipement nécessaire soit disponible (vis de mélanges automatisés).

9.2 Améliorations possibles

9.2.1 Autres paramètres d'influence

Il existe une multitude d'autres paramètres d'influence de la qualité des pâtes et papiers non modélisées dans cette recherche. En particulier, au chapitre 1 on a vu que ce qui a trait aux plaques de raffinage est très important, par exemple le patron des plaques et l'usure des plaques. Il existe d'ailleurs des recherches actives dans ces deux domaines. [101, 102, 103, 104]. Une amélioration de ce travail serait de modéliser la relation entre la qualité des pâtes et l'âge (ou l'usure) des plaques. On pourrait ainsi compenser une baisse de la qualité de pâte causée par l'usure des plaques en ajustant des variables du procédé tel que l'entrefer. Les interactions de l'entrefer avec d'autres variables (par exemple la puissance utilisée dans cette recherche) devraient alors être prises en considération.

Un autre facteur d'influence concerne l'aspect saisonnier du bois (bois de printemps versus bois d'été). Dans une certaine mesure, certaines différences entre ces deux types de bois peuvent probablement être captées par le CMS. Il faudrait cependant faire des analyses plus poussées pour découvrir les corrélations entre les variables CMS et la morphologie différente des fibres de bois de printemps et d'été. D'autres chercheurs du CIPP travaillent activement à cette tâche [105,106].

9.2.2 Étendue du domaine expérimental

Après analyse de la base de données, on constate qu'il existe une très grande variation des propriétés de copeaux entre les groupes d'essais. Par exemple, dans le premier groupe, la composante d'essence du bois est 0%EP, 20%SAP, 40%PG, 40%BOU, mais dans le second groupe elle est 100%PG. Le pourcentage de variation de chaque composante dans ces 2 groupes est donc: $\Delta EP=0\%$, $\Delta SAP=|20-0|/20=100\%$, $\Delta PG=|100-40|/40=150\%$, $\Delta BOU=|40-0|/40=100\%$.

Dans l'usine, la variation des composantes de copeaux est bien sûr beaucoup plus stable. Évidemment, la raison de mettre une telle variation des propriétés de copeaux dans les essais expérimentaux est justement de généraliser le plus possible les relations fonctionnelles modélisées par les RDN. Mais puisque la base de données est tout de même limitée dans le nombre de combinaisons d'un grand nombre de variables, il en résulte inévitablement des erreurs entre les valeurs simulées et les valeurs dans la base de données, surtout quand les variables d'entrée du modèle dépassent les limites de la base de données.

Pour résoudre ce problème, il faudra parfaire et corriger les divers modèles en collectionnant des données expérimentales supplémentaires au fur et à mesure que le procédé fonctionne. Il faudrait en particulier enrichir le nombre de combinaisons des caractéristiques de copeaux pour construire des modèles plus fiables et donc des contrôleurs plus robustes.

9.2.3 Mise à l'échelle

Un problème majeur des essais pilotes concerne la mise à l'échelle industrielle des résultats obtenus. Dans cette recherche, la production du raffineur pilote utilisé est très limitée, le taux de production varie toujours entre 0.33 à 0.85 kg/min, ce qui donne de 0.475 à 1.224T/jour. Bien sûr dans l'usine réelle, la production est beaucoup plus élevée (500T/jour par exemple). Par contre l'énergie spécifique est semblable, de 7 à 11MJ/kg en pilote, et de 2 à 2.6 MWh/T = 7.2 à 9.5MJ/kg en usine [8]. Dans ce cas on peut donc tenter de faire une mise à l'échelle pour calculer l'économie et le profit dans une usine réelle avec les résultats de simulation de cette recherche (comme il a été fait à la section 9.1.4).

Cependant, il n'en demeure pas moins que très souvent les résultats en usine pilote ne sont qu'une indication des tendances auxquelles on doit s'attendre dans le procédé réel. Dans le cas d'un modèle expérimental entre plusieurs variables, comme les RDN dans cette recherche, on doit surtout utiliser la dérivée première des relations fonctionnelles, donc le sens de la variation, plutôt que la valeur exacte obtenue du modèle avec des valeurs mises à l'échelle. Dans le cas particulier des RDN, à cause de l'impossibilité

d'extrapoler des coordonnées hors du domaine d'apprentissage, il est d'ailleurs parfois impossible d'utiliser les modèles pilotes pour y entrer certaines données réelles d'usine, par exemple des taux de production beaucoup plus élevés. Il faut dans ce cas faire de nouveaux essais dans l'usine réelle, comme discuté à la section 9.2.2.

9.2.4 Implantation au DCS du CIPP

Les modèles de cette recherche sont tirés de résultats expérimentaux en usine pilote. Une étape rigoureuse de validation a permis de montrer l'aptitude de ces modèles à reproduire les résultats de la base de données, en plus de généraliser les relations (interpolation du domaine expérimental). Ces modèles ont par la suite servi de base au développement de contrôleurs par anticipation du procédé.

Il n'en demeure pas moins que tous les résultats de cette recherche sont obtenus par simulation sur ordinateur. Il est prévu que la stratégie de contrôle du raffinage développé dans cette recherche soit exportée et adaptée au DCS de l'usine pilote pour un contrôle et une optimisation en ligne de ce procédé.

Bibliographie

- 1 Lanouette, R. 2002. "*Pâtes Mécaniques PNA-6020, Partie 1 Pâtes Mécaniques de Raffineurs*", Notes de cours, Université du Québec à Trois-Rivières, p. 2.
- 2 Münstr, H., Sabourin, M., Fisera, P. 2004 "*The Protocol and Greenhouse Gas Emissions-Implications for Mechanical Pulping*", Pulp & Paper Canada, Vol. 105, no 8, p. 21-26.
- 3 Law, K.-N. 2000. "*Rethinking Chip Refining*", Proc, 54th, Appita Ann, Conf, Vol. 1, p. 101-106.
- 4 Jeffery, S; Wang, T. 2005. "*The Relationship between Refining Speed and Energy Consumption in TMP and CTMP*", Tappi Engineering, Pulping & Environmental Conference, Philadelphia, U.S.A, p. 113-114.
- 5 Miles, K.B., Omholt, I. 2004. "*Improving the Strength Properties of TMP*", Pulp & Paper Canada, Vol.105, no 5, p. 46-52.
- 6 Law., K.-N. 2005. "*An Autopsy of Refiner Mechanical Pulp*", Pulp & Paper Canada, Vol.106, no 1, p. 37-40.
- 7 Kimmo, Latva-Käyrä. 2004. "*Dynamic Calibration of On-Line Consistency Measurement*", Control Systems 2004 Conference, June 14-18, Quebec city, Quebec, Canada, p. 265-268.
- 8 Sundholm, J. 1999. "*Mechanical Pulping*", Book 5 of a series of 19 books "*papermaking Science and Technology*", published by Fapet Oy, printed by Gummerus Priting, Jyväskylä, Finland, p. 18.
- 9 Smook, G. A. 1998. "*Manuel du Technicien et de la Technicienne en Pâtes et Papiers*", deuxième édition, éditeur CCDMD, p. 49 – 61.
- 10 Bergman, T. 1998. "*On-Line Chip Analysis: New Technology for an Improved Pulping Process*", Pulp & Paper-Canada, Vol. 99, no 12, p.150.

- 11 Tiikkaja, E. 1999. "*Fibre Dimensions: Their Effect on Paper Properties and Required Measuring Accuracy*", Pulp & Paper Canada, Vol.100, no 12, p. 114 – 116.
- 12 Miles, K. B., May, W. D., and Karnis, A. 1990. "*Refining Intensity, Energy Consumption and Pulp Quality in Two-Stage Chip Refining*", Tappi Pulping Conference p. 681-690.
- 13 Strand, B. C. 1998. "*Quality Control of High-Consistency Refining*", Tappi Journal, Vol. 81, no 12, p. 159-164.
- 14 Strand, B. C. 1995. "*The Effect of Refiner Variation on Pulp Quality*", International Mechanical Pulping Conference, p.125-130.
- 15 Kure, K.-A., Sabourin, M.J., Dahlgvist, G., Telle, T. 2000. "*Adjusting Refining Intensity by Changing Refiner Plate Design and Rotational Speed - Effects on Structural Fibre Properties*", Journal of Pulp and Paper Science: Vol. 26, no 10, p. 346-352.
- 16 McQueen, S. J., Cluett, W. R., Duever, T. 1999. "*Identification of a TMP Wood Chip Refiner with Implications for Process Control*", TAPPI Journal, Vol. 82, no 5, p. 122.
- 17 Johal, S., Yuen, B., Watson, P. 2006. "*The Effects of Species on the Thermomechanical Pulping of Balsam Fir, Black Spruce, Red Spruce and White Spruce*", Pulp & Paper Canada, Vol. 107, no 7/8, p. 41-45.
- 18 Wu, M.R., Lanouette, R., Valade, J.L. 2004. "*Understanding the Fiber Development during Co-Refining of White Birch and Black Spruce Mixtures. Part 1. Chemithermomechanical Pulping*", Pulp & Paper Canada, Vol. 105, no 12, p. 83-87.
- 19 Wu, M.R., Lanouette, R., Valade, J.L. 2004. "*Understanding the Fiber Development during Co-Refining of White Birch and Black Spruce Mixtures. Part 2.*"

- Chemithermomechanical Pulping*", Pulp & Paper Canada, Vol. 105, no 12, p. 88-92.
- 20 Brill, J. W. 1985. "*Effects of Wood and Chip Quality on TMP Properties*". International Mechanical Pulping Conference Proceedings, Stockholm, p.153-162.
 - 21 Ruel, M. P. E. 2004. "*Process Control, Process Optimization, Loop Turning, Valve Problems control systems, Process Control Technology in the Pulp & Paper Industry, Reference Manual*", Pulp and Paper Technical, Association of Canada.
 - 22 Warren, J. 1999. "*Refining and the Development of Fibre Properties*", Nordic Pulp and Paper Research Journal, Vol. 14, no 4, p. 285-291.
 - 23 Chang, G., Schwartz, H. M. 1996. "*Modeling and Control of the TMP Process*", Control Systems, p. 117-123.
 - 24 Fralic, G., Strand, B. C., Mozaffari, S. 2001. "*Model Predictive Control of High Consistency*", CD-Rom Biblio. TS1116 T425, 2001 TAPPI/ISA-PUPID
 - 25 Cheng, C.S. 1995. "*A Multi-Layer Neural Network Model for Detecting Changes in the Process Mean*", Computers in Engng, Vol. 28, no 1, p. 51-61.
 - 26 Browne, T., Miles, K., McDonald., Wood, J. 2004. "*Multivariate Analysis of Seasonal Pulp Quality Variations in a TMP Mill*", Pulp & Paper Canada, Vol. 105, no10, p. 35-39.
 - 27 Stirling, R; Trung, T., Breuil, P. 2005. "*A Rapid Method of Predicting Wood Chip Decay Using FTIR Spectroscopy*", Pulp & Paper Canada, Vol. 106, no 5, p. 41-45.
 - 28 Soderberg, J.O., Uelmen, R. 1997. "*On-Line Chip Analysis a Tool for an Improved Kraft Pulping Process*", Tappi Proceedings, Pulping Conference, p. 143-154.
 - 29 Ding, F., Benaoudia, M., Bédard, P., Lanouette, R., Lejeune, C., Gagné, P. 2005. "*Wood Chip Physical Quality Definition and Measurement*", Pulp & Paper Canada, Vol. 106, no 2, p. 27-32.

- 30 Sell, N. J., Chair, P. E. 1995. "*Process Control Fundamentals for the Pulp & Paper Industry*", Tappi Press, Technology Park, Atlanta
- 31 May, W. D., McRAE, M. R., Miles. K.B. 1988. "*An Approach to the Measurement of Pulp Residence Time in a Chip Refiners*", Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 14, no 3, p.J47 - J52.
- 32 Miles, K.B. 1994. "*Wood Quality and Energy Consumption in the Production of Refiner Pulps*", Tappi Pulping Conference, p. 401-425.
- 33 Miles, K.B. 1990. "*Refining Intensity and Pulp Quality in High-Consistency Refining*", Paperi Ja Puu – Paper and Timber, Vol. 72, no 5, p. 508-514.
- 34 Leider, P. J., Nissan, A. H. 1977. "*Understanding the Disk Refiner*", Tappi. J., Vol. 60, no 10, p. 80-82.
- 35 Horch, A., Isaksson, A. J. 1997. "*Dynamic Simulation of a Thermomechanical Pulp Refiner*", Nordic Pulp and Paper Research Journal, Vol. 12, no 4, p. 1-7.
- 36 Miles, K.B., May, W. D. 1990. "*The Flow of Pulp in Chip Refiners*", Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 16, no 2, p. J63 – J72.
- 37 Miles, K. B., Karnis, A. 1991. "*The Response of Mechanical and Chemical Pulps to Refining*", Tappi Journal, Vol. 74, no1, p. 157-164.
- 38 Qian, X., Tessier, P. 1994. "*A Mechanistic Model for Predicting Pulp Properties from Refiner Operating Conditions*", Tappi Journal, Vol. 78, no 4, p. 215-222.
- 39 Lama, I., Perrier, M., Stuart, P. 2004. "*Controllability Analysis of a TMP-Newsprint Refining*" Control Systems Conference, June 14-18, Quebec, Canada, p. 99-105.
- 40 Sall, J., Lehman, A., Creighton, L. 2000. "*JMP Start Statistics: A guide to statistics and data analysis using JMP and JMP IN software*", Published by Thomson Learning, Edition: 2nd , ISBN-10: 0534359671

- 41 D. Dong., A. L. Fricke. 1996. "*Influence of Pulping Conditions on Pulp*", Holzforschung, Vol. 50, no 1, p. 74-84.
- 42 Broderick, G. 1997. "*Optimizing Refiner Operation with Statistical Modelling*", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 75, p. 79-87.
- 43 Strand, B.C. 1995 "*Model Based Control of High Consistency Refining*", Tappi Proceedings, Pulping Conference, p. 457-463.
- 44 Vallbäcks, L., Edlund, U., Nordén, B. 1991. "*Multivariate Characterization of Pulp*", Nordic Pulp and Paper Research Journal, no 2, p. 74-81.
- 45 Tessier, P., Broderick, G. 2000. "*Example of Multivariate Statistical Analysis in the Pulp and Paper Industry*", 86th Annual Meeting Preprints, Paptac, Book, p. A225-229.
- 46 Garceau, J.J., Jones, H. W. H. 1975. "*Characterization of Refinedwood Pulp by Operating Parameters*", Transactions Tedi. Sect. CPPA , Vol. 1, no 1, p. 28-32.
- 47 Sundström, L., Tönnesen, R., Nilsson, L. 2001. "*Multivariate Monitoring of a Feeding Process*", International Mechanical Pulping Conference, p523-529.
- 48 Harrison, R. P., Leroux, R., Stuart, P.R. 2004. "*Multivariate Analysis of Refiner Operating Data from a TMP Newsprint mill*", Pulp & Paper Canada, Vol. 105, no 4, p. 24-27.
- 49 Jofriet, P., Seppala, C., Surgenor, B., Harris, T., 1996 ."*An Expert System for Control Loop Performance*", Pulp & Paper Canada, Vol. 97, no 6, p.70-73.
- 50 Blevins, T. L., McMillan, G. K., Wojsznis, W. K., and Brown, M. W. 2003. "*Advanced Control Unleashed-Plant Performance Management for Optimum Benefit*", The Instrumentation, System, and Automation Society, ISBNI-55617-815-8, Edition 1st, Printed in the USA, p. 177-182.

- 51 Joensuu, I., Karlsson, L., Myllyneva, J. 2001. "*Fuzzy Quality Control of a TMP Plant*", International Mechanical Pulping Conference, Vol. 2, p.513-521.
- 52 Qian, Y; Zhang, P. R. 1999. "*On the Fuzzy Logic for Rule Based Modelling and Process Simulation*", Publication: Canadian Journal of Chemical Engineering. Vol. 77, no 1, p.186.
- 53 "La Logique Floue", Site de Bernard Mantel Uniform Resource Location <http://www.chez.com/bmantel/pages/logflou1.html> (Page consultée mars 2003).
- 54 Zhu, J., Xia, Q., Rao, M., Zurcher, J. 1997. "*A Neural Network for Modeling Pulp Process*", *Pulp & Paper Canada*, Vol. 98, no 9, p. 35-38.
- 55 Bell, D. 2002. "*Neural Networks Provide Benefits to Pulp and Paper Manufacturers*", *Pulp & Paper Canada*, Vol. 103, no 9, p.16.
- 56 "Neural Networks", Copyright StatSoft, Inc, 1984-2003 <http://www.statsoft.com/textbook/stneunet.html> (Page consultée January 2008).
- 57 Jones, G. L. 1988. "*Simulating the Development of Pulp and Paper Properties in Mechanical Pulping System*", *Pulp & Paper Canada*, Vol. 89, no 6, p. 128-136.
- 58 Barthelemy, S., "Réseaux de Neurones", Première version: Révision, barth@tac-financial.com <http://www.barth.netliberte.org> (Page consultée mai 2000)
- 59 Qian, Y., Tessier, P., Dumont G A. 1994. "*Fuzzy Logic Modeling and Optimization of a Wood Chip Refiner*", *Tappi Journal*, Vol. 77, no 2, p. 181-186.
- 60 Qian, Y., Tessier, P., Dumont G A. 1995. "*Modeling a Wood-Chip Refiner Using Artificial Neural Networks*", *Tappi Journal*, Vol. 78, no 6, p. 167-174.
- 61 Soderberg, J., Uelmen, R. 1997. "*On-Line Chip Analysis, a Tool for an Improved Kraft Pulping Process*", Tappi Pulping Conference Proceedings, Tappi Press, p.143-154.

- 62 Evans, R., Saarinen, K., Sutinen, R. 1995. "*Developments in Sensors and Control Strategies for Refiners*", Pulp & Paper Canada, Vol. 96, no 6, p. 76-79.
- 63 Grondines, M. 2001. "*Plan D'expérience pour Optimiser l'Opacité sur la Machine à Papier*", Pulp & Paper Canada, Vol. 102, no 4, p. 28-32.
- 64 Raimo, S., Kari, S., Leiviska, Kauro. 1994. "*Adaptive TMP Refiner Control System Based on Optical Consistency Measurement*", Asea Brown Boveri Review, No9, p. 11-18.
- 65 Brill, J. W. 1985. "*Effects of Wood and Chip Quality on TMP Properties*", International Mechanical Pulping Conference Proceedings, p.153-161
- 66 Wood, J. 2001. "*Controlling Wood Induced Variations in TMP Quality*", Tappi Journal, Vol. 84, no 6, p. 32-34.
- 67 Kortelainen, J., Salopuro, A., Halttunen J. 1998. "*Prediction of TMP Quality Properties with On-Line Measurements*", International Mechanical Pulping Conference, Vol. 2, p. 150-151.
- 68 Bergman, T. 2001. "*On-line Chip Analysis New Technology for an Improved Pulping Process*", Pulp & Paper Canada, Vol. 99, no 12, p. 28-32.
- 69 Ding, F. 2002. "*Economizing the Bleaching Agent Consumption by Controlling Wood Chip Brightness*", Proceedings of PAPTAC Control Systems Conference, Stockholm, Suède, p. 205-209.
- 70 Laperrière, L., Leduc, C., Daneault, C., Bédard, P. 2004. "*Chip Properties Analysis for Predicting Bleaching Agents Requirements for TMP Pulps*", Tappi Journal, Vol. 3, no 11, p. 58-62.
- 71 Härkönen, E., Routtu, S., Routtu, A., Johansson, O. 1997. "*A Theoretical Model for a TMP Refiner*", International Mechanical Pulping Conference Proceedings, SPCI, Stockholm, p. 95.

- 72 "Advanced Process Control - Opportunities and Benefits", Uniform Resource Location <http://www.procex.com.au/advanced.htm>, Procex Pty Ltd 39 Balmoral Avenue Brunswick East, Australia 3057 (Page consultée juin 2002)
- 73 Strand, B. C., Mokvist A. 1991. "On Line Control and Optimization of the Refining Process Using a Model-Based Control System", International Mechanical Pulping Conference, Minneapolis, p. 101-108.
- 74 Wood, J. R. 2001. "Controlling Wood-Induced Variation in TMP Quality", Tappi Journal, Vol. 84, no 6, p. 32-34.
- 75 Qian, X., Tessier, P. 1995. "A Mechanistic Model for Predicting Pulp Properties from Refiner Operating Conditions", Tappi Journal, Vol. 78, no 4, p. 215-222.
- 76 Sferrazza, M. 1996. "Refiner Selection and Optimization - Proper Operating Speed, Size, and Design Improvements can Reduce Mill Costs and Power Requirements", Pulp and Paper, Vol. 70, no 2, p. 89.
- 77 Grasham, Greg. R. 1994. "Rule Based PI Control of a TMP Refiner's Motor Load", TAPPI Journal, Vol. 77, no 11, p. 195.
- 78 Dale E. Seborg., Thomas F. Edgar., Duncan A. Mellichamp. 1989. "Process Dynamics and Control", Wiley series in chemical engineering, United States of America, p. 419-424.
- 79 Raimo, S., Kari, S., Leiviska, Kauro. 1994. "Adaptive TMP Refiner Control System Based on Optical Consistency Measurement", Asea Brown Boveri Review, no 9, p. 11-18.
- 80 Tham, M.T., "Internal Model Control", Uniform Resource Location <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/robust/imc.pdf> (Page consultée juillet 2007)
- 81 Sidhu, M.S., Fleet, R.Van., Dion, M.S., Anderson, D.W., Weger, D.W. 2004 . "Modeling and Advanced Control of TMP Refiner System" Control Systems Conference, June 14-18, Quebec, Canada, p. 107-112.

- 82 Lanouette, R., Pierre Bédard And Mokhtar Benaoudia. 2004. "*Effect of Woodchips Characteristics on The Pulp and Paper Properties by the Use of Pls Analysis*", 90th Annual Meeting PAPTAC. Montreal, p. 39-43.
- 83 Ding,F., Benaoudia, M., Bédard, P., Lanouette, R. 2003. "*Effects of Some Wood Chip Properties on Pulp Qualities*", Exfor 2003 Abstracts with CD. 89th Annual Meeting PAPTAC . Montreal, p.37.
- 84 Law, K. N., Garceau, J. J., Kokta, B. V. 1975. "*Characterization of Mechanical Pulp by Thermal Methodes*", Tappi. J., Vol. 58, no 5, p. 98-102.
- 85 Law, K. N., Kokta, B. V., Garceau, J. J. 1976. "*Thermal and Physical Properties of Mechanical Pulps*", Tappi. J., Vol. 59, no 4, p.147-148.
- 86 Norgren, S., Höglund, H., Bäck, R. 2004. "*Irreversible Long Fibre Collapse at HighTemperature TMP Reject Refining – Initial Studies*", Pulp & Paper Canada, Vol. 105, no 7, p. 47-51.
- 87 Miles, K.B., Omholt, I. 2004. "*Improving the Strength Properties of TMP*", Pulp & Paper Canada, Vol. 105, no 5, p. 46-52.
- 88 Omholt, I., Miles, K.B. 2006 "*Pilot Plant Studies on the Thermomechanical Pulping of Western Hemlock*", Pulp & Paper Canada, Vol. 107, no 2, p. 43-46.
- 89 Kure, K. –A., Sabourin, M.J., Dahlqvist, G., and Helle, T. 2000. "*Adjusting Refining Intensity by Changing Refiner Plate and Rotational Speed – Effects on Structural Fibre Properties*", Journal Of Pulp And Paper Science, Vol. 26, no 10, p. 346-352.
- 90 Miles, K.B., W.D. May., and A. Karnis. 1991. "*Refining Intensity, Energy Consumption and Pulp Quality in Two-Stage Chip Refining*", Tappi. J., Vol. 74, no 3, p. 221-230
- 91 McDonald, D., Miles, K.B., and Amiri, R. 2004. "*The Nature of the Mechsnical Pulping Process*", Pulp & Paper Canada, Vol. 105, no 8, p. 27-32.

- 92 Laperrière, L., Wasik, L. 2001. "Modeling and Simulation of Pulp and Paper Quality Characteristics Using Neural Networks", Tappi Journal, Vol. 84, no 10, p. 41-50.
- 93 Felder, R. M., and Rousseau R. W. 1986. "Elementary principles of chemical processes", John Wiley and Sons, ISBN 0-471-87324-1
- 94 Loisa, M., Nybom, H., Kortelainen, J., Jakobsson, J., Tukiainen, K. 2004. "Freeness Soft Sensor in TMP-Refining", Control Systems Conference, June 14-18, Quebec, Canada, p. 227-231.
- 95 Asikainen, S., Loisa, M., Luntta, E., Halttunen, J. 2004. "Prediction of Machine Stock and Paper Sheet Properties with On-Line Pulp Quality Measurements", Control Systems Conference, June 14-18, Quebec, Canada, p. 237-240.
- 96 Amiri, R., Begin, B., Deshaies, S., Mozaffari, S. 2004. "Effects of Wood and Pulp Quality on Linting Propensity", Pulp & Paper Canada, Vol. 105, no 6, p. 23-30.
- 97 Pulkkinen, P., Ritala, R., Mosher, A., Tienari, M. 2004. "Designing Operator Decision Support System for TMP Production Based on Dynamic Simulation and Optimisation", Control Systems Conference, June 14-18, Quebec, Canada, p. 215-218.
- 98 Scott, G.M. "Economic Evaluation of Biopulping", Uniform Resource Location [En ligne] <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1998/scott98d.pdf> (Page consultée juillet 2007)
- 99 Marcus, D., "Commercial Hemp Cultivation in Canada - An Economic Justification", http://naihc.org/hemp_information/content/dmarcustx.html#anchor7013005 (Page consultée juillet 2007)
- 100 "Pulp and Paper Market News for Asia", Uniform Resource Location <http://www.risiinfo.com/Marketing/Newsletters/AN.pdf> (Page consultée juillet 2007)

- 101 Frazier, W.C. 2006. “*Refiner Tram and Its Contribution to Pulping Movement in High Consistency Refiners*”, Pulp and Paper Canada, Vol. 107, no 3, p. 48-51.
- 102 Ortiz-Cordova, M., Hagedorn, J.-A., Baril, J., Bégin, B., Paris, J. 2006. “*Analysis of Paper Strength Variability in an Integrated Newsprint Mill*”, Pulp and Paper Canada, Vol. 107, no 10, p. 37 – 48.
- 103 Chagaev, O., Zou, X. 2007. “*A New Concept to Characterize Fibre Development in Refining and Mechanical Pulp Quality for LWC and SC Grades*”, Pulp and Paper Canada, Vol. 108, no 1, p. 50 – 56.
- 104 Yang, S., Lu, L., Ni, Y. 2006. “*Cloned Poplar as a New Fibre Resource for the Chinese Pulp and Paper Industry*”, Pulp and Paper Canada, Vol. 107, no2, p. 34 – 37.
- 105 Mao, C., Law, K.N., Kokta, B.V., “*Effect of Sulfonation on the Compression Behaviour of Early – and Latewood*”, Pulp and Paper Canada, Vol. 105, no 12, p. 67 – 71.
- 106 Law, K., Lanouette, R., Huang, F. 2007. “*Impact of Early- and Latewood on Thermomechanical Pulping*”, Exfor Abstracts with CD. 93th Annual Meeting PAPTAC . Montreal.

Annexe 1 Méthode Lambda

Considérons le diagramme du contrôleur à rétroaction ci-dessous. La consigne est Y_{sp} et la variable mesurée est Y_{pv} .

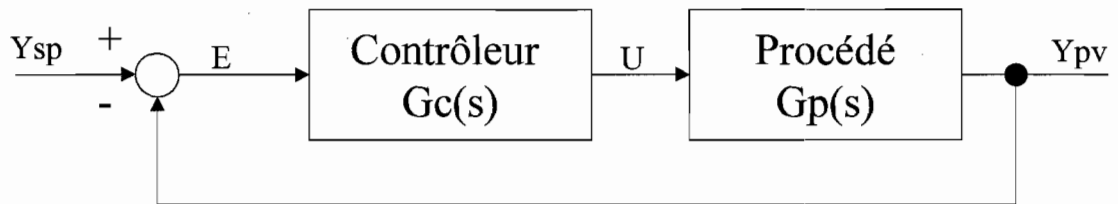


Figure A1-1 Procédé à rétroaction

Les autres variables de cette figure sont :

E : erreur entre Y_{sp} et Y_{pv} ;

U : variable manipulée (action de contrôle) générée par contrôleur ;

$G_c(s)$: gain du contrôleur ;

$G_p(s)$: gain du procédé.

La fonction de transfert de la boucle fermée $G_{sp}(s)$ est :

$$Y_{pv} = (Y_{sp} - Y_{pv}) * G_c(s) * G_p(s) \quad \text{Equation A1-1}$$

$$G_{sp}(s) = Y_{pv} / Y_{sp} = G_c(s) * G_p(s) / [1 + G_c(s) * G_p(s)] \quad \text{Equation A1-2}$$

$$G_c(s) = [1 / G_p(s)] * \{G_p(s) / [1 - G_{sp}(s)]\} \quad \text{Equation A1-3}$$

Pour un procédé de premier ordre, la réponse de la boucle fermée pour un changement de la consigne est:

$$G_{sp}(s) = 1 / (\lambda s + 1) \quad \text{Equation A1-4}$$

où:

λ : constante de temps désirée de la boucle fermée.

En combinant les équations A3-3 et A3-4, on obtient :

$$G_c(s) = [1 / G_p(s)] * [1 / \lambda s] \quad \text{Equation A1-5}$$

Pour un procédé du premier ordre, $G_p(s)$ peut être calculé par l'équation suivante :

$$G_p(s) = K_p / (\tau s + 1) \quad \text{Equation A1-6}$$

où:

K_p: gain proportionnel

τ: constante de temps

Avec les équations A3-5 et A3-6, on peut calculer :

$$G_c(s) = [\tau / (K_p * \lambda)] * [(\tau s + 1) / \tau s] \quad \text{Equation A1-7}$$

$$G_c(s) = K_c * [(\tau s + 1) / \tau s] \quad \text{Equation A1-8}$$

où:

K_c: gain de contrôleur

En effectuant diverses substitutions on obtient finalement :

$$K_c = \tau / (K_p * \lambda) = (1 / K_p) * (\tau / \lambda) \quad \text{Equation A1-9}$$

Le gain de procédé K_p et la constante de temps τ peuvent être obtenus avec un « bump test » en boucle ouverte (figure A1-2).

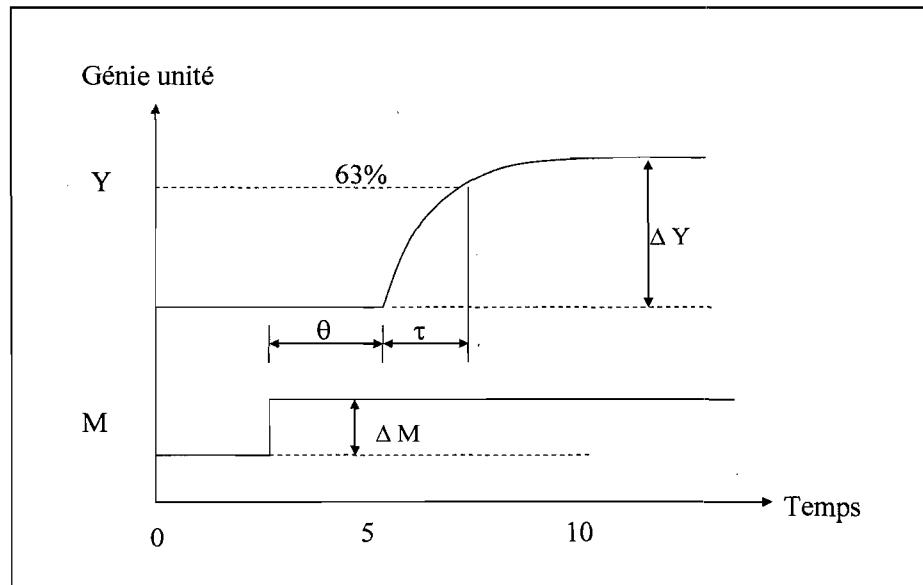


Figure A1-2 « bump test » sur un système du premier ordre avec délai

$$K_p = \Delta Y / \Delta M$$

Equation A1-10

où:

ΔM : l'augmentation de la variable manipulée

ΔY : l'augmentation correspondante de la variable mesurée